

Электронный архив УГЛТУ



А. Е. Морозов
Н. И. Стародубцева

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уральский государственный лесотехнический университет»
(УГЛТУ)**

**А. Е. Морозов
Н. И. Стародубцева**

**МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ
И ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ**

Учебное пособие

Екатеринбург
2020

УДК 504.3.054:551.5(075.8)

ББК 26.231.2.27я73

М80

Рецензенты:

кафедра биоразнообразия и биоэкологии Института естественных наук и математики Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, доктор биологических наук, профессор Третьякова А. С.;

Шепоренко Г. А., главный синоптик ФГБУ «Уральское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»

Морозов, А. Е.

М80 Метеорологические условия и загрязнение атмосферы : учебное пособие / А. Е. Морозов, Н. И. Стародубцева ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2020. – 128 с.

ISBN 978-5-94984-752-7

Содержатся сведения о специфике и характере влияния метеорологических элементов (солнечной радиации, температуры воздуха, влажности воздуха, туманов, осадков, ветра) и метеорологических условий в целом на накопление и рассеивание загрязняющих веществ в атмосфере; методах оценки рассеивающей способности атмосферы на основе комплексных метеорологических показателей; особенностях прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха; контроле качества атмосферного воздуха и мероприятиях по регулированию выбросов.

Предназначено для обучающихся по направлениям 05.03.06 «Экология и природопользование», 35.03.01 «Лесное дело», 35.3.05 «Садоводство».

Издается по решению редакционно-издательского совета Уральского государственного лесотехнического университета.

УДК 504.3.054:551.5(075.8)

ББК 26.231.2.27я73

Фото обложки из открытых источников.

ISBN 978-5-94984-752-7

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 2020

© Морозов А. Е., Стародубцева Н. И., 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Примеси в атмосфере и источники их образования.....	5
2. Влияние метеорологических элементов и метеорологических условий на накопление и рассеивание загрязняющих веществ в атмосфере.....	13
2.1. Солнечная радиация.....	14
2.2. Температура воздуха	18
2.3. Влажность воздуха.....	39
2.4. Туманы.....	40
2.5. Осадки.....	47
2.6. Ветер.....	51
2.7. Синоптическая ситуация.....	60
3. Методы оценки рассеивающей способности атмосферы на основе комплексных метеорологических показателей.....	65
4. Прогнозирование загрязнения атмосферы.....	83
5. Контроль качества атмосферного воздуха и мероприятия по регулированию выбросов в период неблагоприятных метеорологических условий.....	107
Заключение.....	119
Библиографический список.....	120

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее распространенных и опасных по своим последствиям видов негативного воздействия на окружающую среду является загрязнение атмосферного воздуха. Охрана атмосферного воздуха от загрязнения относится к числу приоритетных направлений охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности промышленных предприятий и иных объектов негативного воздействия. Вместе с тем для эффективного планирования и реализации мероприятий по охране атмосферного воздуха необходимо знать закономерности накопления и рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере с учетом влияния различных факторов и условий как антропогенного, так и природного характера. На процессы накопления и рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере существенное влияние оказывают как отдельные метеорологические элементы, так и метеорологические условия в целом. В свою очередь, загрязнение атмосферного воздуха оказывает влияние и на сами метеорологические элементы и условия.

По своей физической природе атмосфера является весьма подвижной средой, в которой происходят непрерывные изменения метеорологических элементов (температуры, давления, влажности, направления и скорости ветра и др.). При этом изменения одних метеорологических элементов влекут за собой изменения других. Вместе с тем характеристики некоторых метеорологических элементов зависят от широты местности, времени года и топографических условий, типа подстилающей поверхности и ряда других факторов. Всё это необходимо учитывать при оценке взаимосвязи загрязнения атмосферного воздуха и отдельных метеорологических элементов и метеорологических условий в целом.

Знание особенностей накопления и рассеивания в атмосфере загрязняющих веществ в зависимости от отдельных метеорологических элементов и условий позволяет более достоверно прогнозировать характер и степень её возможного загрязнения, а также грамотно и обоснованно планировать мероприятия по предотвращению и минимизации последствий такого загрязнения.

Учебное пособие, по мнению авторов, может быть использовано студентами экологически направленных специальностей при освоении таких учебных дисциплин, как «Метеорология и климатология», «Учение об атмосфере», «Климатология», «Оценка воздействия на окружающую среду», «Нормирование и снижение загрязнения окружающей среды», «Техногенные системы и экологический риск», «Инженерная защита окружающей среды», «Ландшафтно-экологическое планирование для оптимизации природопользования», «Экологический мониторинг окружающей среды».

1. ПРИМЕСИ В АТМОСФЕРЕ И ИСТОЧНИКИ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

Примеси, или аэрозоли, представляют собой многочисленные взвешенные в атмосферном воздухе твердые и жидкие вещества.

Согласно ГОСТ 17.2.1.04-77 «Атмосфера. Источники и метеорологические факторы загрязнения промышленными выбросами. Термины и определения» (1977) под *примесями* понимаются *рассеянные в атмосфере вещества, не содержащиеся в ее постоянном составе*.

Аэрозоли – это в основном очень мелкие и легкие частицы диаметром от тысячных долей микрометра до десяти микрометров, способные длительное время (от нескольких суток до нескольких лет) удерживаться в атмосфере во взвешенном состоянии. Аэрозоли удаляются из атмосферы либо в результате вымывания осадками (до 80 %), либо за счет гравитационного осаждения на подстилающую поверхность (до 20 %). Ввиду малой скорости оседания аэрозолей они активно вступают в химические реакции с малыми газовыми составляющими атмосферы и свободными радикалами. Главными малыми газовыми составляющими атмосферы являются озон (O_3), углекислый газ (CO_2), метан (CH_4), оксид углерода (CO), закись азота (N_2O). Основные свободные радикалы в атмосфере – атомарный кислород (O_2), гидроксил (OH), пергидроксил (HO_2), атомарный азот (N).

Атмосферные аэрозоли имеют очень изменчивый химический состав и физические характеристики, являясь сложными продуктами химических и физических процессов в атмосфере.

В зависимости от состава и источников образования выделяют примеси естественного (природного) и искусственного (антропогенного) происхождения.

К *природным примесям* относятся частицы пыли космического и вулканического происхождения, кристаллы морской соли (продукты испарения морских брызг), частицы сажи от лесных пожаров, продукты выветривания горных пород и почвы, пыльца растений, бактерии, споры растений и грибов, капельки воды и кристаллы льда, продукты природных газофазных реакций (сульфаты, образующиеся за счет восстановленной серы, поступающей с поверхности океана). Наиболее мощными источниками естественных примесей являются вулканы, пыльные и песчаные бури, лесные пожары, частицы океанического происхождения. На их долю приходится более половины общего количества природных примесей в атмосфере.

Морские аэрозоли – это кристаллы хлорида натрия. Они гигроскопичны, образуют капли, в состав которых могут входить сульфаты, карбонаты, калий, магний, кальций, органические соединения.

Вулканические аэрозоли представляют собой частицы измельченной лавы или капли серной кислоты, содержащей сульфаты, галогениды, следы никеля и хрома. Вулканы – важный источник аэрозолей, вклад которых, как правило, изменяется во времени и в пространстве.

Продукты выветривания поступают в атмосферу с поверхности почвы и скальных пород. На их долю приходится значительная часть аэрозолей.

Пирогенные аэрозоли поступают в атмосферу в результате природных пожаров. Состав таких аэрозолей – неорганические вещества, минералы, частицы углерода, продукты неполного сгорания смолы (живицы) древесных пород.

Метеорные аэрозоли, или метеорная пыль, – это субмикронные частицы межпланетного пространства, затвердевшие при сгорании космических метеоров, которые достигают тропосферы и земной поверхности.

Частицы биологического происхождения, или *биологические аэрозоли* (споры грибов, пыльца, бактерии), имеют диаметр более 1 микрона.

К *антропогенным примесям* относятся выбросы промышленных предприятий и автотранспорта, промышленная и дорожная пыль, капельки кислот, щелочей, различные жидкости, твердые органические вещества и пр.

Ежегодное поступление в атмосферу твердых аэрозолей естественного происхождения составляет порядка 1280 ± 885 млн т/год, антропогенного – соответственно 50 ± 40 млн т/год. Большая часть (95 %) твердых примесей имеет радиус менее 5 мкм.

По месту нахождения аэрозоли делятся на *тропосферные* и *стратосферные*. В тропосфере максимальное количество аэрозолей наблюдается у земной поверхности, а с высотой оно быстро убывает. Так, на высотах от 5 до 10 км количество взвешенных частиц насчитывается не более нескольких десятков в 1 см^3 .

В стратосфере по сравнению с тропосферой аэрозоли распределены по высоте относительно равномерно и являются более однородными по своему составу. Здесь они образуются в результате окисления серосодержащих газов, формируя так называемый *слой Юнге* – аэрозольный слой, находящийся в нижней части стратосферы, состоящий преимущественно из частиц серной кислоты и воды диаметром

0,14 мкм. Название слоя дано по имени ученого Кристиана Юнге, обнаружившего его в 1960 г. Толщина этого слоя составляет около 10 км. Его нижняя граница расположена примерно на высоте тропопавзы в тропических широтах и на 2–4 км выше ее уровня в полярных широтах.

Причинами образования стратосферных аэрозолей являются извержения вулканов, развитие кучево-дождевых облаков выше тропопавзы и образование в результате этого ядер конденсации в стратосфере, полеты самолетов, запуски космических и других ракет.

Стратосферные аэрозоли могут оказывать существенное влияние на атмосферные процессы. Так, согласно Н.И. Толмачевой (2012), возрастание количества серосодержащих аэрозолей в стратосфере приводит к увеличению планетарного альбеда Земли и понижению глобальной температуры.

В столбе атмосферного воздуха сечением 1 см^2 содержится 10^8 – 10^9 аэрозольных частиц. Общий их вес в атмосфере составляет 10^8 т.

От количества и вида атмосферных аэрозолей зависят процессы поглощения и рассеяния солнечной радиации в атмосфере, а также ее прозрачность для солнечных лучей.

Крупные аэрозольные частицы, обладающие гигроскопическими свойствами, представляют собой ядра конденсации.

По данным Н.И. Толмачевой (2012), содержание в атмосфере аэрозолей естественного происхождения больше, чем аэрозолей техногенного происхождения. Вместе с тем в крупных промышленных районах содержание антропогенных аэрозолей может превышать содержание природных аэрозолей. Причинами образования антропогенных аэрозолей могут являться их прямой синтез на промышленном производстве, выбросы в атмосферу и последующие физико-химические превращения (например фотохимические смоги).

На долю аэрозолей техногенного происхождения в атмосфере Земли в среднем приходится примерно 20 % от содержания природных аэрозолей.

Размеры аэрозольных частиц колеблются от 10^{-7} мм до нескольких миллиметров. Распространена классификация размеров аэрозольных частиц, разработанная К. Юнге, согласно которой частицы делятся на три группы в зависимости от их радиуса: менее 10^{-4} мм – так называемые ядра *Айткена*; от 10^{-4} до 10^{-3} мм – большие; более 10^{-3} мм – гигантские частицы.

Согласно данным Л.Т. Матвеева (1984), в настоящее время по сравнению с 1910 г. масса твердых примесей в атмосфере Северного полушария увеличилась примерно в полтора раза. Это связано с ростом промышленного производства и урбанизации территории. Содержание антропогенных примесей в атмосфере в случае превышения предельно допустимых концентраций негативно влияет на здоровье людей, растительность, животный мир, а также на деятельность ряда промышленных предприятий и транспортных отраслей.

Аэрозоли переносятся восходящими потоками от источника их выброса и распределяются в атмосфере по вертикали. При этом с помощью воздушных потоков примеси могут переноситься на значительное расстояние. Например, известны случаи переноса частиц дыма лесных пожаров из Канады через Атлантику в Норвегию, а также пыли песчаных бурь из африканских пустынь на территорию Европы (Косарев, Таранков, 1991).

Наибольшее количество аэрозолей содержится в нижних слоях атмосферы и особенно в воздухе крупных промышленных центров. Например, в городах в 1 см^3 насчитываются десятки тысяч аэрозольных частиц, в воздухе сельской местности – тысячи, а над океанами – сотни. Ежегодно в атмосферу поступает от 1 до 2 млрд т аэрозолей. При этом только на территории СНГ на земную поверхность в год осаждается от 200 до 800 т / км^2 аэрозолей.

Наиболее распространенными и вредными для живых организмов аэрозолями являются сернистый газ, окислы азота, окись углерода. Эти вещества образуются в большом количестве при сжигании топлива. При этом в крупных городах доля выбросов аэрозолей от автотранспорта может достигать 80 %. В результате неполного сгорания топлива в случае недостатка кислорода в газовой смеси либо при низких температурах окружающего воздуха в атмосферу поступают различные углеводороды, в том числе ароматического и полициклического ряда, обладающие канцерогенным эффектом.

Определение качественного и количественного состава атмосферных аэрозолей оценивается по химическому составу осадков.

Роль аэрозолей в атмосферных процессах достаточно велика. Они влияют на распространение солнечной радиации и даже на формирование климата отдельных географических районов и планеты в целом.

Аэрозоли удаляются из атмосферы за счет атмосферной конвекции, вымывания осадками, гравитационного осаждения.

Время жизни аэрозолей представляет собой период, за который их концентрация снижается в несколько раз. Механизм удаления из

атмосферы аэрозолей зависит прежде всего от их размеров. Так, самые мелкие частицы (ядра Айткена) удаляются из атмосферы за счет коагуляции и диффузионного осаждения, а крупные частицы – за счет их седиментации. Важным процессом удаления аэрозолей из тропосферы является конвекция, в результате которой аэрозоли переносятся из нижних слоев атмосферы в верхние, попадая в слои облаков, в которых происходит их поглощение водяными каплями или вымывание осадками. Так называемое подоблачное вымывание наблюдается при поглощении аэрозолей выпадающими из облаков каплями воды или снежинками. Кроме того, аэрозоли могут удаляться из атмосферы за счет осаждения их на естественных препятствиях, в виде возвышенных элементов рельефа или наземных предметов.

Время жизни аэрозолей в атмосфере зависит от высоты их расположения. По данным Н.И. Толмачевой (2012), время жизни аэрозолей в тропосфере составляет не более одного месяца, в стратосфере на высоте 20 км – 1–2 года, на высоте 50 км – 5–10 лет.

В определенных условиях природные и антропогенные примеси будут являться причиной загрязнения атмосферного воздуха.

В соответствии с Федеральным законом от 04.05.1999 г. № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» (1999) под *загрязнением атмосферного воздуха* понимается поступление в атмосферный воздух или образование в нем загрязняющих веществ в концентрациях, превышающих установленные государством гигиенические и экологические нормативы качества атмосферного воздуха. Соответственно, под *загрязняющим веществом* понимается химическое вещество или смесь веществ, в том числе радиоактивных, и микроорганизмов, которые поступают в атмосферный воздух, содержатся и (или) образуются в нем в количестве и (или) концентрациях, превышающих установленные нормативы, оказывают негативное воздействие на окружающую среду, жизнь, здоровье человека.

Согласно ГОСТ 17.2.1.04-77 (1977) загрязнение атмосферы, обусловленное природными процессами, называется *естественным*, а обусловленное деятельностью человека, – *антропогенным*.

Газовое загрязнение атмосферы представлено в основном сернистым газом (SO_2), оксидом углерода (CO), диоксидом углерода (CO_2), окислами азота (NO_x), сероводородом (H_2S), различными углеводородами, аммиаком (NH_3).

В атмосфере протекают химические реакции, в результате которых происходит взаимодействие газов, особенно сернистого, и окислов азота, с кислородом, водяным паром. Кроме того, происходят

фотохимические превращения, в результате чего образуются новые вещества в твердом или жидком состоянии.

Как известно, загрязнение атмосферы будет зависеть от объема выбросов вредных веществ, их химического состава, высоты источника выброса, метеорологических условий, влияющих на характер переноса, рассеивания и превращения загрязняющих веществ.

Согласно ГОСТ 17.2.1.04-77 (1977) *источником загрязнения атмосферы* называется объект, распространяющий загрязняющие атмосферу вещества. При этом источники загрязнения делятся на *источники выделения* и *источники выброса* загрязняющих веществ. *Источник выделения* загрязняющих веществ – объект (технологическая установка, агрегат, машина или технологический процесс), в котором возникают и из которого выделяются загрязняющие вещества, но не поступают на этой стадии в атмосферу. *Источник выброса* загрязняющих веществ – объект (устройство, механизм, установка), от которого загрязняющие вещества поступают в атмосферу.

На пути от источника выделения до источника выброса загрязняющие вещества должны проходить через пылегазоочистные установки и подвергаться очистке до нормативных показателей.

Согласно приказу Минприроды России от 06.06.2017 г. № 273, которым утверждены «Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» (далее «Методы...», 2017), в зависимости от высоты расположения отверстия h (устья источника выброса), через которое содержащая загрязняющие вещества пылегазовоздушная смесь поступает в атмосферный воздух, источники выбросов делятся на *наземные* (при h до 2 м включительно), *низкие* (от 2 до 10 м включительно), *средней высоты* (от 10 до 50 м включительно) и *высокие* (свыше 50 м).

В зависимости от геометрических параметров согласно «Методам...» (2017) различают точечные, линейные и плоские (площадные) источники загрязнений атмосферы.

Точечный – источник, выбрасывающий загрязняющие вещества в атмосферу из установленного отверстия. Точечные источники (трубы, шахты, факелы, вентиляционные каналы и т. д.) выделяют загрязняющие вещества в точках, расположенных так, что наложение областей распространения загрязняющих веществ в циркуляционной зоне за отдельно стоящим зданием или в пределах межкорпусного пространства отсутствует.

Линейный – источник, выбрасывающий загрязняющие вещества в атмосферу по установленной линии. Линейные источники имеют

значительную протяженность в определенном направлении (аэрационные фонари, открытые оконные проемы, технологические линии и т. д.).

Точечные источники, области распространения примесей которых налагаются друг на друга в пределах примыкающей к зданию половины заветренной циркуляционной зоны, также относят к линейным источникам.

Принципиальным отличием линейных источников от точечных является практически постоянная концентрация загрязняющих веществ в любой точке приземного слоя; напротив, при действии точечных источников распространения примесей концентрация изменяется, ее максимум отмечается по оси факела.

Плоским называется источник, выбрасывающий загрязняющие атмосферу вещества с установленной поверхности. К этому типу относят рассредоточенные на обширной территории источники неорганизованного выброса (ввиду негерметичности, отсутствия системы газоотвода) или группы однотипных источников организованного выброса (отвалы, шламонакопители, полигоны отходов, открытые резервуары, разливы загрязняющих веществ на поверхности почвы, совокупность мелких вентиляционных источников).

По времени действия, согласно «Методам...» (2017), источники выбросов подразделяют на постоянные, периодические и залповые.

Постоянный – источник, выбрасывающий в атмосферу загрязняющие вещества непрерывно в течение длительного периода времени. Именно источники постоянного выброса загрязняющих веществ вносят основной вклад в загрязнение промплощадок и прилегающей территории при нормальном функционировании объектов.

Периодический – источник, выбрасывающий в атмосферу загрязняющие вещества периодически, в течение относительно короткого периода времени.

Залповый – источник, выбрасывающий в атмосферу за короткий промежуток времени большое количество вредных веществ. Залповые выбросы возможны при авариях или взрывных работах. Иногда при залповых выбросах загрязняющие вещества выбрасываются в доли секунды на значительную высоту.

По степени подвижности различают стационарные и подвижные источники выбросов.

Стационарные – это источники, которые в процессе образования, выделения и выброса загрязняющих веществ не изменяют своих координат в пространстве.

Подвижные источники меняют свое местонахождение с течением времени, например автотранспорт.

По степени оснащенности средствами защиты атмосферы источники выбросов делятся на оснащенные и неоснащенные.

Оснащенные имеют средства защиты атмосферы от выбросов загрязняющих веществ в виде установок и аппаратов газоочистки и пылеулавливания.

Неоснащенные выбрасывают загрязняющие вещества в атмосферу без очистки.

По характеру действия различают организованные и неорганизованные промышленные выбросы.

Организованные – это промышленные выбросы, поступающие в атмосферу через специально сооруженные газоходы, воздухопроводы, трубы.

Неорганизованные промышленные выбросы поступают в атмосферу в виде ненаправленных потоков газа в результате нарушения герметичности оборудования, отсутствия или неудовлетворительной работы оборудования по отсосу газа в местах загрузки, выгрузки или хранения продукта.

Контрольные вопросы

1. Что такое примеси и аэрозоли? Как они классифицируются?
2. В каких случаях примеси природного или антропогенного происхождения могут выступать в качестве загрязняющих веществ?
3. Дайте определение следующим понятиям: источник загрязнения, источник выделения, источник выброса.
4. Для каких целей применяются методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе?
5. На какие виды делятся источники выброса в зависимости от высоты?
6. На какие виды делятся источники выбросов в зависимости от времени действия?
7. Что понимается под организованными и неорганизованными выбросами?

2. ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА НАКОПЛЕНИЕ И РАССЕИВАНИЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ

Между загрязнением атмосферы и рядом метеорологических элементов, таких как солнечная радиация, температура воздуха, влажность воздуха, осадки, ветер, имеется определенная связь, описанная в ряде работ (Марчук, 1982; Марчук и др., 1983; Матвеев, 1984; Лазарева, Попова, 2014; Крюкова, Симакина, 2015). Даже при постоянных объемах и составах выбросов загрязняющих веществ в атмосферу под влиянием тех или иных метеорологических условий уровни ее загрязнения в различных точках могут различаться весьма существенно. В связи с этим при оценке загрязнения атмосферы целесообразно использовать вместо отдельных метеорологических элементов комплексные параметры, характеризующие конкретную метеорологическую ситуацию и конкретные метеорологические условия. К примеру, известно, что при прогнозировании загрязнения атмосферного воздуха требуют внимания сочетания опасных скоростей ветра с определенными параметрами термической стратификации атмосферы и приземной инверсией температуры.

Определенное сочетание метеорологических элементов формирует те или иные метеорологические условия.

Под *метеорологическими элементами* понимается общее название для ряда характеристик состояния воздуха и некоторых атмосферных процессов. К метеорологическим элементам прежде всего относят те характеристики состояния атмосферы и атмосферные процессы, которые непосредственно наблюдаются на метеорологических станциях: атмосферное давление, температуру и влажность воздуха, ветер (горизонтальное движение воздуха), облачность (по количеству и формам), количество и вид выпадающих осадков, видимость, туманы, метели и пр. Сюда же относятся продолжительность солнечного сияния, температура и состояние почвы, высота и состояние снежного покрова и пр.

В расширенном значении термином «метеорологические элементы» обозначают подразделения некоторых указанных выше основных характеристик (например максимальную температуру, минимальную температуру, скорость ветра, количество облаков, формы облаков, относительную влажность, упругость пара). Кроме того, к метеороло-

гическим элементам следует относить радиационные и атмосферно-электрические характеристики атмосферы, а также характеристики свободной атмосферы, определяемые аэрологическими методами. К метеоэлементам также относят и функции отдельных элементов, не измеряемые, а вычисляемые (например эквивалентную температуру, плотность воздуха, коэффициент прозрачности и пр.) (Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь. Том 2, 2009).

Под *метеорологическими условиями* понимается состояние атмосферы, характеризующее значения метеорологических элементов в определенный момент, или за определенный срок, или за время разворачивания того или иного процесса, мероприятия и т.д. (Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь. Том 2, 2009).

Описание влияния тех или иных метеорологических элементов и формирующихся при определенном их сочетании метеорологических условий и тех или иных метеорологических ситуаций на накопление и рассеивание загрязняющих веществ в атмосфере дано в разделах 2.1 – 2.7 главы 2.

2.1. Солнечная радиация

Солнечная радиация играет ключевую роль в формировании уровня загрязнения атмосферы. Так, высокая интенсивность солнечной радиации, характерная для южных районов страны, способствует фотохимическим реакциям, протекающим в атмосфере. В результате таких реакций происходит трансформация первичных исходных загрязняющих веществ зачастую в еще более опасные производные соединения.

В ясные дни фотохимические реакции могут вызывать образование фотохимического смога и усиливать экологическую опасность загрязнения приземного слоя воздуха. Ярким примером протекающих в атмосфере подобных фотохимических процессов является окисление сернистого газа, приводящее к образованию сульфатных аэрозолей. Наиболее вредный продукт фотохимической реакции – пероксиацетилнитрат (ПАН).

Кроме того, солнечная радиация оказывает влияние на процессы теплопередачи от земной поверхности атмосфере и прежде всего на турбулентную теплопроводность. Интенсивное тепловое излучение солнца в ясный день над открытой местностью приводит к изменению вертикального градиента температуры. Например, если указанный градиент в нижних слоях атмосферы превышает адиабатическую

скорость снижения температуры, то это может приводить к возникновению сильных турбулентных потоков в нижних слоях атмосферы. При таких условиях вертикальное перемещение воздуха возрастает, а рассеивание загрязняющих веществ становится более интенсивным, особенно в вертикальном направлении. Вместе с тем в устойчивом слое воздуха, когда температура с высотой в нем не изменяется (наблюдается изотермия) или когда она повышается с высотой (наблюдается инверсия), для увеличения вертикального движения воздуха необходимо затратить значительную энергию. Таким образом, в условиях устойчивой атмосферы при одинаковых скоростях ветра загрязняющие вещества накапливаются в относительно небольшом по толщине слое воздуха.

Одной из важных количественных характеристик солнечной радиации является радиационный баланс земной поверхности, величина которого также будет зависеть от наличия примесей в атмосфере. Так, в крупных городах, где уровень загрязнения, как правило, выше, существенно изменяются все составляющие радиационного баланса земной поверхности по сравнению с окрестностями. Например, по данным Л.Т. Матвеева (1984), в крупных городах Западной Европы по сравнению с сельской местностью освещенность земной поверхности и поток суммарной солнечной радиации ослаблены на 30–35 % при малых высотах Солнца над горизонтом и на 15–20 % при больших высотах солнца. Особенно резко уменьшается поток ультрафиолетовой радиации. Так, в центре Парижа доля ультрафиолетовых лучей составляет в общем потоке 0,3 %, а в его пригородах – уже 3 %. В Санкт-Петербурге радиационные характеристики земной поверхности уменьшены по сравнению с окрестностями на следующие значения: поток прямой солнечной радиации зимой – на 40–55 %, летом – на 3–5 %; поток суммарной радиации зимой – на 25–35 %, летом – на 6–7 %; эффективное излучение зимой – на 10 %, летом – на 15 %; альбедо зимой – на 14–16 %, летом – на 1–4 %.

Потоки прямой солнечной радиации в городе ослаблены по причине поглощения их облаком загрязняющих веществ. При этом, поскольку загрязняющие вещества поглощают и излучают инфракрасную радиацию, встречное излучение атмосферы в городе больше, а эффективное излучение земной поверхности меньше, чем в окрестностях.

В городе под влиянием застройки, асфальтирования улиц, изменения структуры и состава растительного покрова, загрязнения снежного покрова и других поверхностей изменяется показатель альбедо

(отражающей способности поверхностей). В городах наблюдается эффект многократного отражения потока отраженной солнечной радиации от зданий.

В городах весной по сравнению с окрестностями альбедо резко снижается благодаря раннему сходу снежного покрова. По данным Л.Т. Матвеева (1984), например, для Санкт-Петербурга эта разница в марте-апреле может составлять 25–30 %.

Радиационный баланс земной поверхности в том же Санкт-Петербурге зимой и весной на 15–20 % больше, чем в окрестностях, а летом и осенью практически не отличается.

Е. В. Милановой, А. М. Рябчиковым (1979) была изучена связь между радиационным режимом атмосферы и разложением загрязняющих веществ, поступающих в нее. Авторами отмечено, что в процессах распространения загрязняющих веществ в атмосфере значение имеют величина радиационного баланса и интенсивность ультрафиолетовой радиации. Ультрафиолетовая радиация, проникая в приземный слой атмосферы, способствует фотохимическим реакциям. Авторами установлено, что процессы разложения загрязняющих веществ при низких значениях радиационного баланса протекают медленнее, чем при высоких значениях данного показателя. Замедление разложения загрязняющих веществ характерно прежде всего для районов Крайнего Севера, что способствует формированию здесь устойчивых концентраций и увеличению продолжительности периода высокого загрязнения.

В зависимости от величины радиационного баланса выделяются территории с *низкой* (величина радиационного баланса $20 \text{ ккал/см}^2/\text{год}$), *средней* (величина радиационного баланса $20\text{--}40 \text{ ккал/см}^2/\text{год}$) и *высокой* (величина радиационного баланса $60\text{--}80 \text{ ккал/см}^2/\text{год}$ и выше) скоростью разложения загрязняющих веществ в атмосфере (Миланова, Рябчиков, 1979).

Между интенсивностью солнечной радиации и содержанием в воздухе пыли прослеживается некоторая зависимость. Так, по данным В. Фетта (1961), в солнечные дни содержание пыли в приземном слое атмосферы изменяется в течение суток следующим образом: с восходом солнца содержание пыли начинает уменьшаться, после полудня почти не изменяет своей величины, а вечером вновь увеличивается. Перед восходом солнца, когда температура воздуха достигает минимума, запыленность его максимальна и в несколько раз больше, чем после полудня. Уменьшение содержания пыли в приземном слое в течение дня обусловлено обменными потоками и турбулентностью.

Нагревание этого слоя в утренние часы вызывает перераспределение радиационного баланса, что, в свою очередь, приводит к перемещению частиц пыли, которые поглощают тепловую радиацию и окружаются теплой воздушной оболочкой. Нагретые порции воздуха вытесняются поступающими сверху более холодными и чистыми порциями, благодаря чему в приземном слое содержание пыли уменьшается. В период наиболее интенсивного обмена воздуха в послеполуденное время содержание пыли очень мало. В утренние часы максимальное содержание пыли наблюдается у земной поверхности, а также недалеко от нее на границе слоя инверсий. До полудня запыленность воздуха быстро уменьшается с высотой. Пылинки, проникшие через сравнительно малоподвижный приземный слой, легко уносятся вверх. В течение дня они поднимаются вместе с конвекционным слоем, где распределение частиц почти однородно. В послеполуденное время распределение пыли по высоте в сфере действия конвекционных потоков приблизительно равномерно.

Концентрация пыли в воздухе в целом меньше летом в холодных воздушных массах и больше зимой в теплых воздушных массах (Фетт, 1961).

Содержащаяся в воздухе пыль оказывает влияние на излучательную способность атмосферы. Так, атмосферная пыль частично поглощает тепло, излучаемое земной поверхностью в космическое пространство, и таким образом уменьшает ночное охлаждение приземных слоев воздуха.

Используя свойства пыли для предотвращения вреда, причиняемого заморозками, вблизи от поверхности почвы путем дымления создают искусственный толстый слой дыма и пыли, уменьшающий эффективное излучение поверхности почвы.

Витающие в атмосфере пылинки, поглощая и излучая тепло, ускоряют дневное перемешивание и нагревание приземного слоя воздуха. Излучаемое пылью тепло распространяется одинаково во всех направлениях, и поэтому пыль, подобно водяному пару, является часто причиной духоты (Фетт, 1961).

При сильной запыленности воздуха снижается интенсивность прямой солнечной радиации. По данным К. Бюттнера (Buttner, 1929), потеря прямой солнечной радиации вследствие дымки большого города составляет 20 % во всех областях спектра.

Существует мнение, что одна из причин изменения климата вызвана снижением прозрачности атмосферы для тепловых лучей вследствие загрязнения ее вулканической пылью.

Кроме того, осевшая на поверхность ледников и снежного покрова пыль может способствовать их таянию за счет снижения отражательной способности.

2.2. Температура воздуха

На накопление и распространение загрязняющих веществ в атмосфере существенное влияние оказывает её термический режим, ключевыми характеристиками которого являются температура воздуха, особенности распределения температуры воздуха по вертикали, наличие и характеристики инверсий, сумма активных температур за период активной вегетации.

Между температурой атмосферного воздуха и уровнем его загрязнения наблюдается опосредованная связь, определяемая расходом топлива на отопление различных объектов. Например, в зимний период с увеличением расхода топлива на отопление объемы выбросов загрязняющих веществ от котельных повышаются, что приводит к росту концентраций загрязняющих веществ в атмосфере.

Большое количество источников выбросов в крупных городах делает их своеобразными островами тепла, особенно в зимний период года. Это сказывается на особенностях рассеивания загрязняющих веществ в городе. Как правило, в городе по сравнению с периферией повышенная температура воздуха приводит к увеличению концентрации загрязняющих веществ. Как показывают многочисленные наблюдения, в городах с численностью населения более 1 млн жителей температура воздуха выше, чем в окрестностях, в среднем на 1–2 °С. Эта разница зависит от времени суток и сезона года. Так, она больше ночью, чем днем, и больше летом, чем зимой. При этом на разницу температур существенное влияние оказывают облачность и скорость ветра. С увеличением облачности и скорости ветра эта разность уменьшается. При сплошной низкой облачности и скорости ветра более 10–12 м/с разность температур близка к нулю.

По данным Л. Т. Матвеева (1984), максимальная температура воздуха наблюдается в центре города, а к его периферии она плавно уменьшается. Соответственно, максимальные концентрации загрязняющих веществ также наблюдаются при прочих равных условиях в центральной части города, а к периферии происходит их плавное снижение. Однако данная закономерность будет справедлива только в отношении городов старой планировки, где большая часть источников выбросов сосредоточена в центральной части города. В городах

современной планировки значительная часть источников выбросов может находиться на территории промзоны, которая вынесена за пределы города, таким образом, указанная выше закономерность соблюдаться не будет.

На термический режим городов, помимо всего прочего, влияют следующие составляющие теплового баланса: турбулентные и конвективные потоки теплого воздуха; тепло, расходуемое на испарение влаги с подстилающей поверхности; тепло, расходуемое на нагрев почвы; адвективные притоки теплого воздуха. В целом затраты тепла на испарение в городе и окрестностях существенно отличаются. Это связано с тем, что в городах осадки сразу после выпадения в основном стекают в люки и решетки ливневой канализации, что приводит к уменьшению затрат тепла на испарение влаги с подстилающей поверхности по сравнению с окрестностями, где осадки поступают непосредственно в почву. На указанное различие практически не влияет даже регулярный полив улиц в городах. В качестве примера приведем данные Л. Т. Матвеева (1984), согласно которым в районе г. Колумбия (США) в летний безоблачный день при слабом ветре менее 3 м/с поток скрытого тепла составлял $0,01 \text{ Вт/м}^2$, а в его окрестностях – $2,04 \text{ Вт/м}^2$. При этом потоки тепла в почву составляли соответственно $4,53 \text{ Вт/м}^2$ в городе и $1,67 \text{ Вт/м}^2$ в его окрестностях.

Вместе с тем, по данным Г. И. Марчука и др. (1982, 1983), на особенности формирования метеорологического режима города по сравнению с таковыми в окрестностях (например на различия в средних температурах воздуха) преимущественно влияют геофизические факторы (потоки солнечной радиации, а также явного и скрытого тепла), а вклад прямых антропогенных выбросов тепла промышленными предприятиями, транспортом и энергетическими установками составляет не более 10 %.

Существенное влияние на уровень загрязнения атмосферы оказывают приземные и приподнятые инверсии, наблюдаемые при устойчивой стратификации атмосферы.

Инверсия температуры – это повышение температуры с высотой в некотором слое воздуха. Характер влияния инверсий на распространение загрязняющих веществ определяется их видом. При инверсии воздух быстро теряет свою подъемную силу, поскольку охлаждается при этом несколько меньше, чем температура окружающей среды. Таким образом образуется слой, препятствующий рассеиванию загрязняющих веществ в вертикальном направлении. При такой вертикальной стратификации развитие турбулентности затруднено,

что ограничивает слой перемешивания. В таких условиях газоздушная смесь из дымовых труб не может подняться высоко вверх и сносится ветром в горизонтальном направлении.

Для изучения инверсий обычно применяется метод радиозондирования атмосферы, который является наиболее достоверным.

Основными характеристиками инверсий являются их повторяемость, мощность и интенсивность. *Повторяемость* инверсий – это отношение числа случаев с инверсией к общему числу наблюдений за состоянием атмосферы, выраженное в процентах. Под *мощностью инверсий* понимается разность между верхней и нижней границами инверсий в километрах. Под *интенсивностью инверсий* понимается разность температур на ее нижней и верхней границах, выраженная в градусах Цельсия.

Частным случаем инверсий с нулевой интенсивностью является *изотермия* – состояние атмосферы, при котором температура воздуха с высотой не изменяется в некотором слое.

По высоте формирования инверсии делятся на два вида: приземные и приподнятые.

Приземной называется инверсия, при которой повышение температуры воздуха начинается непосредственно от земной поверхности, а *приподнятой* – при которой повышение температуры начинается с некоторой высоты. Такие инверсии в основном связаны с охлаждением подстилающей поверхности в ночные часы, несколько реже – с адвекцией теплого воздуха на холодную подстилающую поверхность. Приземные инверсии играют большую роль в накоплении выбросов преимущественно от низких источников, таких как автотранспорт.

Ввиду того, что инверсии оказывают значительное влияние на рассеивание загрязняющих веществ, в целях прогнозирования наступления неблагоприятных метеорологических условий необходимо знать закономерности распределения их повторяемости. При этом более существенную роль играет повторяемость приземных инверсий.

По данным справочника «Климатические характеристики...» (1983), частота появления приземных инверсий на территории СНГ в течение года увеличивается с запада на восток и уменьшается на побережьях морей и океанов. Наиболее редко (20–30 % случаев) они встречаются в Прибалтике и Белоруссии, на побережье Каспийского моря и в Закавказье. На остальной части европейской территории страны повторяемость приземных инверсий меняется в пределах 30–40 %, а ее рост начинается над бассейном р. Оби (Салехард, Тобольск) и за

Уралом, достигая 45–50 %. Над территорией Восточной Сибири, Дальнего Востока и Средней Азии повторяемость приземных инверсий увеличивается и достигает 60 % и более.

Повторяемость приземных инверсий различается по сезонам года. *Зимой* они возрастают: наименьшие значения (около 30 %) наблюдаются на западе европейской территории страны, наибольшие (до 80 %) – в районе Якутии и в бассейнах рек Колымы и Индигирки. На побережьях северных и восточных окраинных морей повторяемость приземных инверсий в зимний период также велика (60–70 %).

Весной контрасты повторяемости приземных инверсий на территории страны сглаживаются от 20 % в западных районах до 55 % в Восточной Сибири.

Летом в континентальной части страны на распределение приземных инверсий влияет радиационный фактор. После захода солнца инверсии начинаются от земной поверхности, а перед восходом солнца достигают наибольшего своего развития, приобретая широтное распределение их повторяемости. Наименьшая повторяемость приземных инверсий (13–25 %) приходится на заполярные районы, где нет условий для длительного радиационного выхолаживания приземного слоя атмосферы, в связи с очень длинным полярным днем, а также наличием сильных ветров. Чуть больше, до 25 %, повторяемость приземных инверсий отмечается в Прибалтике, на побережье Черного моря, в Приморском крае, на Камчатке и Сахалине, а наибольшая (50–60 %) отмечается в Средней Азии и Северо-Восточном континентальном районе (до 50 %). Повышенная повторяемость приземных инверсий (35–40 %) летом наблюдается на юге Урала, в Казахстане, Красноярском крае и Якутии. Чуть меньшая повторяемость (до 25–30 %) приходится на Иркутскую область и Хабаровский край. В Забайкалье (Чара) повторяемость приземных инверсий увеличивается до 40 %.

Осенью широтное распределение приземных инверсий несколько нарушается. По-прежнему наименьшие значения (до 25 %) наблюдаются на побережьях северных морей. Повторяемость увеличивается до 30 % на большей части ЕТС, в Северном Казахстане и на севере Красноярского края. Как и летом, повторяемость приземных инверсий до 40–55 % является повышенной в Средней Азии, Иркутской области, в Забайкалье и Хабаровском крае, а в континентальных районах Магаданской области она достигает 70 %, так как здесь уже в осенний период устанавливается зимний характер распределения температуры воздуха с высотой.

На годовой ход повторяемости приземных инверсий оказывают влияние крупные водные объекты, повышая повторяемость приземных инверсий до 40–55 % летом, когда под влиянием большой массы воды, температура которой ниже температуры окружающего ее воздуха, происходит охлаждение его нижних слоев. Весной продолжительность инверсионного распределения температуры приземного слоя воздуха увеличивается вследствие длительного и интенсивного таяния льда на побережьях северных и северо-восточных морей.

Суточный ход приземных инверсий представляет собой периодические колебания с одним максимумом и одним минимумом (Климатические характеристики..., 1983). Для расчета повторяемости приземных инверсий в то или иное время суток указанным справочником предложено использовать уравнение ряда Фурье. При этом для различных географических районов страны (всего их предложено выделить девять) в уравнение следует подставлять разные коэффициенты.

На европейской территории страны (ЕТС) повторяемость приземных инверсий в суточном ходе составляет от 5–20 % днем до 35–55 % ночью. При этом на юге и юго-востоке ЕТС она возрастает до 60 %. Наибольшая же амплитуда повторяемости отмечается на территории Средней Азии, где она достигает ночью 80–90 %, а днем снижается до 3–5 %.

Суточный ход повторяемости приземных инверсий для срединных месяцев каждого сезона (января, апреля, июля и октября), по данным справочника «Климатические характеристики...» (1983), имеет свои закономерности.

Зимой (январь) над большей частью территории страны суточный ход повторяемости приземных инверсий выражен слабо и его амплитуда увеличивается к югу за счет уменьшения повторяемости инверсий днем.

Весной (апрель) над большей частью территории страны в темное время суток, как и зимой, повторяемость приземных инверсий сохраняется высокой, а в светлое время инверсии повсеместно разрушаются и их повторяемость не превышает 10 %.

Летом (июль) в утренние и дневные часы приземные инверсии наблюдаются редко и составляют на большей части территории страны всего 5 %. В некоторых районах СНГ, например в Средней Азии и Красноярском крае, летом в утренние и дневные часы по сравнению с зимой повторяемость приземных инверсий существенно повышается. В континентальных районах Восточной Сибири и Дальнего Востока днем в теплое полугодие инверсий почти не наблюдается (повторяе-

мость не превышает 1–6 %). Летом здесь большую роль при формировании инверсий играет муссонная циркуляция, а вблизи морей, крупных рек и озер – бризовая циркуляция.

Осенью (октябрь) смена циркуляционных процессов происходит постепенно. В ночное время происходит усиление циклонической деятельности и повторяемость приземных инверсий уменьшается. В Средней Азии она также остается высокой, поскольку октябрь здесь еще относится к теплomu времени года.

Помимо повторяемости инверсий, большое значение на накопление примесей у земной поверхности оказывают их мощность и интенсивность. В годовом ходе мощность и интенсивность приземных инверсий значительно меняется. Максимум наблюдается зимой, минимум – летом.

Средняя за год мощность приземных инверсий на территории СНГ (ЕТС, Средняя Азия, Закавказье) находится в пределах 0,3–0,5 км. В Сибири она имеет наибольшее значение (до 1,0 км), но при этом уменьшается к югу.

Среднегодовая интенсивность приземных инверсий варьирует в более широких пределах: от 7–10 °С в Якутии и Магаданской области до 1,5–4,0 °С на побережьях морей (Климатические характеристики..., 1983).

Для оценки устойчивости пограничного слоя атмосферы используют такой показатель, как *высота слоя перемешивания*, которая примерно соответствует высоте пограничного слоя с наблюдающимися интенсивными вертикальными движениями воздуха. Эти движения вызваны нагреванием слоя воздуха солнечной радиацией. При этом вертикальный градиент температуры в этом слое близок к сухадиабатическому либо превышает его.

Высоту слоя перемешивания определяют путем аэрологического зондирования атмосферы. Максимальная толщина слоя перемешивания на текущий день определяется по аэрологической диаграмме за утренний срок с учетом ожидаемой максимальной температуры воздуха. Для оценки вклада слоя перемешивания в формирование метеорологических условий, способствующих загрязнению, недостаточно определять только экстремальные значения толщины слоя, следует рассчитывать среднее значение для дня и ночи (РД 52.04.306-92, 1992).

Увеличение концентрации загрязняющих веществ в атмосфере обычно наблюдается при опускании слоя перемешивания ниже

1,5 км. Если высота слоя перемешивания составляет выше 1,5 км, загрязнения воздуха, как правило, не наблюдается.

Анализ годового хода максимальной высоты слоя перемешивания показал, что на территории страны отмечаются существенные различия в ее средних месячных значениях, но закономерности сезонных изменений проявляются почти везде одинаково: максимум наблюдается летом (май-август), минимум зимой (декабрь-январь). На побережьях морей Дальнего Востока характер годового хода максимальной высоты слоя перемешивания неоднозначен.

В большинстве случаев максимальная высота слоя перемешивания зимой (ноябрь-февраль) составляет 0,3–0,6 км, и только в некоторых крупных городах, например в Москве, где на изменение устойчивости атмосферы сказывается влияние самого города, она увеличивается до 0,65–0,75 км (Высота слоя перемешивания, 1979).

Пределы изменения этой важной метеорологической характеристики следует учитывать при прогнозе загрязнения воздуха.

В атмосфере на фоне средних скоростей переноса воздушного потока наблюдаются случайные элементы турбулентного обмена, интенсивность которого характеризуется так называемым *коэффициентом турбулентного обмена* K_1 . Он включает в себя и термические и динамические факторы, которые влияют на рассеивание примесей.

Определяют коэффициент турбулентного обмена на высоте 1 м от деятельной поверхности по данным ежедневных градиентных наблюдений за температурой воздуха и скоростью ветра в слое 0,5–2,0 м. Сведения о его пространственном распределении необходимы для вычисления коэффициента A , характеризующего условия вертикального и горизонтального рассеивания вредных веществ, которые зависят от температурной стратификации атмосферы (приказ Минприроды России от 06.06.2017 г. № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе»). Коэффициент A рассчитывается в случае наступления неблагоприятных метеорологических условий для рассеивания загрязняющих веществ, при интенсивном вертикальном турбулентном обмене в приземном слое воздуха, когда приземная концентрация в воздухе выбросов от высокого источника достигает максимальных значений.

Средние значения K_1 на территории СНГ изменяются в пределах 0,04–0,12 м²/с. Наименьшие значения наблюдаются на северо-западе ЕТС, на северо-востоке Сибири, а также в горных районах Средней

Азии. Наибольшие значения K_1 характерны для Украины и Поволжья, степей Казахстана и для пустынных районов Туркмении и Узбекистана.

Следует отметить, что в крупных городах за счет изменения ветрового режима максимальные значения K_1 бывают заниженными.

В ночное время средние месячные значения K_1 в Восточной Сибири, Забайкалье и Средней Азии изменяются в пределах 0,01–0,05 м²/с. На северо-западе ЕТС, в степной и пустынной зонах, где скорость ветра повышена, пределы значений K_1 выше и составляют 0,07–0,12 м²/с.

Годовые амплитуды средних значений K_1 по территории СНГ различаются не очень сильно, изменяясь ночью (в 01 час) от 0,01 до 0,09 м²/с, а днем – от 0,04 до 0,17 м²/с. Ночью меньшая амплитуда характерна для районов Восточной Сибири и Дальнего Востока и предгорных районов и оазисов, днем же здесь отмечаются наибольшие амплитуды.

Суточные амплитуды K_1 зимой в южных районах и пустынях равны 0,06–0,08 м²/с, на остальной территории они составляют 0,01–0,02 м²/с. Летом (в июле) они увеличиваются в южных районах до 0,16 м²/с, а в северных до 0,08 м²/с.

В течение суток самые большие значения отмечаются в послеполуденные часы между 13 и 16, чаще в 13 часов.

Несмотря на широкое разнообразие природных условий временным изменениям K_1 свойственны некоторые общие черты. Наибольшие значения K_1 наблюдаются в светлое время суток и в теплое полугодие.

Годовой ход коэффициента турбулентного обмена складывается из его средних значений за сроки 01 и 13 часов и зависит днем от сочетания особенностей стратификации и режима скорости ветра, а ночью, когда преобладает инверсия или изотермия, определяется средней скоростью ветра. В разных географических районах максимальные значения K_1 в северной части ЕТС могут отмечаться с июня по сентябрь, причем переход значений K_1 от зимы к лету происходит очень быстро. В центральных районах ЕТС максимальные значения K_1 четко выделяются в апреле и сентябре-октябре, т. е. в те месяцы, когда скорости ветра усиливаются. В Поволжье годовой ход K_1 выражен слабо, а в Средней Азии и Казахстане, где уже весной велика инсоляция, а скорости ветра мало меняются в течение года, максимум значений K_1 сдвинут на начало весны и может наблюдаться до августа, годовая же амплитуда мала. В Восточных районах Сибири

наибольшая годовая амплитуда значений K_I наблюдается в мае-июне и в сентябре, составляя 0,065–0,085 м²/с.

В горных районах годовой ход K_I существенно отличается от наблюдаемого на ровной местности. Так, в горных районах Армении максимальные значения K_I отмечаются с февраля по апрель и в октябре, а в горных районах Кыргызстана – в октябре (Климатические характеристики..., 1983).

При рассмотрении годового хода K_I в разные часы суток (01 и 13 часов) можно заметить, что наибольшие значения K_I днем приходятся на летнее время, а ночью на ряде станций – на холодное. Этот факт объясняется в основном термической стратификацией: летом днем она неустойчива и способствует росту K_I , а ночью вследствие увеличения устойчивости значения K_I уменьшаются. Зимой как днем, так и ночью большое значение имеет динамический фактор (скорость ветра), который приводит в ряде случаев к росту K_I ночью.

В случае *приподнятых (высотных) инверсий* повышение температуры воздуха начинается с некоторой высоты над земной поверхностью (чаще выше 0,01 км). При таких инверсиях, когда их нижняя граница располагается над высокими источниками выброса, наблюдается интенсивное загрязнение атмосферы. По данным С. В. Крюковой и Т. Е. Симакиной (2015), в случае, если слой приподнятой инверсии опускается ниже устья трубы источника выброса, поступление загрязняющих веществ в приземный слой происходит ограничено. Кроме того, авторы показывают, что степень влияния приподнятых инверсий на уровень загрязнения воздуха будет зависеть от высоты расположения источника загрязнения. В случае расположения источника ниже слоя инверсии основная масса загрязняющих веществ скапливается вблизи земной поверхности.

В зависимости от нижней границы приподнятые инверсии обычно разделяют на следующие градации: 0,01–0,25 км, 0,26–0,50 км, 0,01–0,50 км, 0,01–2,00 км.

Приподнятая инверсия с нижней границей, расположенной над источником выброса (точнее, над его эффективной высотой, которая для горячих источников выше геометрической вследствие начального подъема факела), часто может являться причиной наступления аномально неблагоприятных метеорологических условий. Концентрация примеси существенно зависит от высоты расположения нижней границы инверсии над источником.

Влияние инверсионных слоев на распространение выбросов для тяжелых примесей проявляется слабее, чем для легких, причем с ростом размера частиц примесей это влияние уменьшается.

Особенно сильное загрязнение воздуха у земной поверхности может наблюдаться при холодных выбросах и наличии приподнятой инверсии, расположенной непосредственно над источником, а также слабом ветре, близком к штилю, в приземном слое воздуха. В этом случае концентрации загрязняющих веществ могут во много раз увеличиваться по сравнению с нормальными условиями.

По данным справочника «Климатические параметры...» (1983), приподнятые инверсии на территории СНГ наблюдаются в целом значительно реже, чем приземные. Частота приподнятых инверсий зависит от географического района. Например, низкие приподнятые инверсии с нижней границей 0,01–0,25 км в среднем за год чаще всего отмечаются в центральной и южной частях ЕТС (Курск, Рязань, Воронеж, Ростов-на-Дону). Здесь их повторяемость составляет 10–16 %. На территории Прибалтики, на севере ЕТС, в Средней Азии и Западной Сибири повторяемость низких приподнятых инверсий составляет менее 10 %. В долинах крупных рек, таких как Енисей и Лена, а также на побережьях дальневосточных морей они отмечаются в 6–8 % случаев, на территории Восточной Сибири и Забайкалья – всего лишь в 3–6 % случаев.

По данным справочника «Климатические характеристики...» (1983), среднегодовая повторяемость приподнятых инверсий небольшая, однако она имеет четко выраженные сезонные изменения. Так, в центральной и южной частях ЕТС в холодное время года их повторяемость достигает 20–35 % (в районе городов Калач и Оренбург). В Прибалтике, на севере ЕТС (в районе г. Архангельск), а также на побережьях Черного и Каспийского морей годовой ход повторяемости приподнятых инверсий выражен слабо – он изменяется от 5–8 % зимой до 3–4 % летом. В Красноярском крае, Забайкалье и Якутии низкие приподнятые инверсии наблюдаются в основном в утренние часы летом, а их повторяемость достигает 15–25 %. В бассейне р. Енисей повторяемость приподнятых инверсий увеличивается с юга (от 5 % в Хакасии) на север (до 25 % в районе Подкаменной Тунгуски).

Резкое увеличение повторяемости низких приподнятых инверсий в континентальной части Восточной Сибири, по мнению составителей справочника «Климатические характеристики...» (1983), объясняется тем, что они образуются при разрушении снизу приземных

инверсий за счет интенсивного радиационного нагрева подстилающей поверхности и развития конвекции.

Низкие приподнятые инверсии также могут иметь адвективное происхождение, вызванное бризовой и муссонной циркуляциями на побережьях дальневосточных морей (в районах бухты Нагаева, о. Беринга, Петропавловска-Камчатского, Владивостока, Николаевска-на-Амуре). Наблюдаются они в основном летом.

Среднегодовая повторяемость приподнятых инверсий с расположением нижней границы в слое 0,01–0,50 км над территорией СНГ составляет 10–25 %. При этом ее максимальные значения (20–25 %) наблюдаются в западных районах страны. К востоку от Урала – на территории Западной Сибири в районе Кургана и в Новосибирске – она составляет 16–18 %, в Красноярске, Иркутске и Чите – 5–8 %. Вдоль побережий дальневосточных морей наблюдается ее увеличение до 13–24 %. Повторяемость приподнятых инверсий с нижней границей 0,01–0,50 км зимой существенно уменьшается от 40–55 % над центральной и южной частями европейской территории страны до 15–20 % над северной. В Западной Сибири и Казахстане приподнятые инверсии отмечаются в 20–30 % случаев, в Восточной Сибири и Забайкалье – всего в 3–11 %, в Приморском крае повторяемость их увеличивается до 23 %.

В летний период повторяемость приподнятых инверсий с нижней границей в слое 0,01–0,50 км по территории СНГ распределяется более равномерно, чем зимой. Так, над всей европейской территорией страны ее значения изменяются от 3 до 12 %, увеличиваясь при этом в Закавказье и на побережье северных морей до 21–22 %. В Средней Азии летом приподнятые инверсии почти не наблюдаются (повторяемость 2–4 %). В долинах сибирских рек повторяемость приподнятых инверсий составляет 9–19 % (в Игарке – 17 %, в Подкаменной Тунгуске – 16 %, в Якутске – 14 %), а на побережье Дальнего Востока – до 20–35 %.

В годовом ходе на большей части европейской территории страны, на Урале, в Западной Сибири повторяемость приподнятых инверсий в слое 0,01–0,50 км аналогична повторяемости других высотных инверсий. При этом максимум повторяемости отмечается зимой, а минимум – летом. Так, в центральной части и на юго-востоке ЕТС зимой (декабрь-январь) максимум достигает 35–55 %, а летом (июнь-июль) ее значение снижается до 5–10 %.

В широтном направлении повторяемость приподнятых инверсий в слое 0,01–0,50 км уменьшается с севера на юг. Таким образом, на

севере ЕТС их годовой ход выражен лучше, чем на юге. На территории Забайкалья приподнятые инверсии образуются редко, а их годовые колебания выражены слабо. В районах муссонной циркуляции Дальнего Востока наблюдается увеличение повторяемости приподнятых инверсий в летний период.

Приподнятые инверсии с границей 0,01–0,50 км зимой над европейской территорией страны повторяются в любое время суток достаточно часто. При этом рост их повторяемости отмечается днем в юго-восточной части страны. В летний период эти инверсии отмечаются в основном утром, достигая повторяемости 30–40 %. В иное время суток их повторяемость снижается до 5–10 %. На территории Сибири круглый год ночью повторяемость приподнятых инверсий с нижней границей 0,01–0,50 км практически не наблюдается, а летом в дневные и вечерние часы их повторяемость достигает в среднем 25–35 %. При этом в Якутске в этот период она может достигать 50 %, а в Чаре – 55 %. На побережьях дальневосточных и северных морей максимальная повторяемость приподнятых инверсий летом наблюдается утром, достигая 40 % во Владивостоке, 28 % в бухте Нагаево и 19 % в Анадыре (Климатические характеристики..., 1983).

Среднегодовая повторяемость высотных инверсий с нижней границей в слое 0,01–2,00 км на территории СНГ составляет 15–45 %. Из них около половины имеет нижнюю границу от 0,01 до 0,50 км. Таким образом, особенности распределения всех высотных инверсий в общих чертах напоминают особенности распределения инверсий с нижней границей в слое 0,01–0,50 км.

Наибольшая повторяемость всех высотных инверсий в целом наблюдается в районах Прибалтики, Белоруссии и в центральной части европейской территории страны, а также на побережьях Черного и Каспийского морей, составляя 40–59 %. Минимальные значения повторяемости отмечены в Средней Азии и Восточной Сибири.

Зимой над европейской территорией страны инверсии с нижней границей в слое 0,01–2,00 км наблюдаются в 50–75 % случаев, уменьшаясь к северу и востоку до 35–40 %. В Сибири они отмечаются реже. Более всего их в Западной Сибири (28–45 %), менее всего в Иркутской области, Якутии и Забайкалье (10–14 %). На побережье Охотского и Японского морей повторяемость высотных инверсий вновь увеличивается до 29–43 %.

В теплом полугодии над большей частью территории СНГ повторяемость высотных инверсий меньше, чем в холодный период года, и составляет 30 %.

Более частые высотные инверсии отмечаются лишь на побережье северных и северо-восточных морей, составляя 40–55 %.

Среднегодовые показатели мощности и интенсивности приподнятых (высотных) инверсий за отдельные сроки наблюдений и в целом за сутки по слою 0,01–2,00 км в разных районах СНГ невелики. Над европейской территорией страны они составляет 0,3–0,5 км и к востоку увеличиваются до 0,5–0,6 км (в районах городов Самара, Пермь, Уфа, Пенза). В Сибири и Казахстане мощность приподнятых инверсий равна 0,4–0,6 км, а на побережье дальневосточных морей немного меньше – 0,35–0,4 км. Самые высокие годовые значения мощности приподнятых инверсий (0,70–0,75 км) отмечаются в континентальных районах Восточной Сибири.

Интенсивность приподнятых инверсий в среднем за год на территории СНГ изменяется от 1,5 до 3,5 °С. Самые низкие значения наблюдаются над европейской территорией страны на побережьях морей (Рига – 1,5 °С, Туапсе – 1,1 °С) и в Закавказье (Тбилиси – 0,6–0,8 °С, Ереван – 1,5 °С). Над азиатской территорией страны так же, как мощность, интенсивность инверсии несколько выше, чем над европейской территорией страны. Самые высокие значения интенсивности приподнятых инверсий по территории СНГ (4,2–4,3 °С) отмечены в континентальных районах Восточной Сибири, самые низкие (0,5–0,8 °С) – в горных районах Средней Азии (Душанбе, Джелал-Абад), а также на Камчатке.

Значения сезонных изменений мощности и интенсивности низких приподнятых инверсий примерно такие же, как и значения приземных, так как низкие приподнятые инверсии (0,01–0,50 км), как правило, образуются при разрушении нижней части приземных инверсий. Приподнятые инверсии наибольшей мощности и интенсивности формируются зимой, наименьшей – летом. Исключение составляют дальневосточные прибрежные районы (бухта Нагаева, Южно-Сахалинск), где отмечено два максимума: в зимние и летние месяцы.

Наиболее четко годовой ход мощности приподнятых инверсий выражен в северной части Восточной Сибири. Над европейской территорией страны в течение суток увеличение наблюдается, как и для приземных инверсий, ночью, при этом весной и осенью их суточный ход выражен слабее, чем летом или зимой.

С увеличением высоты отмечается уменьшение интенсивности и мощности приподнятых инверсий. Годовой и суточный ход интенсивности и мощности этих инверсий в слое 0,01–2,00 км выражен

слабо. Над европейской территории страны наибольшие их значения обычно наблюдаются ночью либо ранним утром, над азиатской территорией страны – днем при разрушении приземных инверсий снизу.

Несмотря на распространенное мнение, что инверсия температуры воздуха является одним из приоритетных и определяющих факторов формирования высоких концентраций загрязняющих веществ в атмосфере, часто это утверждение встречает критику у ряда авторов. Так, многие считают, что загрязнение воздуха зависит не только от его термической стратификации (устойчивости атмосферы), но и от скорости ветра (Некоторые характеристики..., 1967; Метеорологические условия..., 1988; Мажиг и др., 1988). При отсутствии ветра и устойчивой атмосфере концентрация в ней загрязняющих веществ повышается. Низкие скорости ветра (3–7 м/с) и устойчивая атмосфера способствуют повышению загрязнения воздуха. В случае сильных ветров связь между загрязнением воздуха и устойчивостью атмосферы вообще отсутствует.

В случае расположения инверсионного слоя непосредственно над источником выбросов происходит ограничение подъема загрязняющих веществ, что приводит к увеличению их концентрации на 50–70 %. При расположении инверсионного слоя ниже устья трубы источника выброса возникает препятствие для поступления загрязняющих веществ в приземный слой.

Наличие большого числа низких источников в условиях города обуславливает свою специфику накопления примесей. Так, в этих условиях опасная ситуация будет наблюдаться при приземных и низких приподнятых инверсиях, способствующих ослаблению турбулентного обмена и созданию благоприятной ситуации для скопления загрязняющих веществ.

По данным Л. Т. Матвеева (1984), в городах преобладают приподнятые инверсии, а в окрестностях – приземные. Так, по данным наблюдений в Москве в районе Останкинской телебашни, в среднем за год на долю приподнятых инверсий приходится 44 %, а на долю приземных – 13 % от общего числа наблюдений. В подмосковном Обнинске соотношение почти обратное: повторяемость приподнятых инверсий составляет 15 %, а приземных – 38 %.

В целом в случае образования инверсии над городом наблюдается увеличение на 10–60 % содержания загрязняющих веществ в атмосфере по сравнению с периодом ее отсутствия.

Интенсивность инверсий зависит от времени суток. Так, непосредственно перед или сразу после захода солнца приземный слой

воздуха очень быстро охлаждается и возникает устойчивая скорость падения температуры, что способствует повышению температуры воздуха с высотой и формированию инверсионного слоя. В течение ночи интенсивность и глубина этой инверсии возрастают, достигая максимума между полуночью и восходом солнца, когда земная поверхность имеет минимальную температуру. В течение этого периода атмосферные загрязнения эффективно задерживаются внутри слоя инверсии или ниже его благодаря слабому или полному отсутствию переноса загрязнений по вертикали.

Следует отметить, что в условиях застоя воздуха загрязняющие вещества, выбрасываемые из низких источников выбросов, не распространяются в верхние слои атмосферы. Вместе с тем выбросы из высоких труб в данных условиях в основном не проникают в приземные слои воздуха. В дальнейшем с увеличением высоты солнца над горизонтом земная поверхность начинает нагреваться и инверсия постепенно исчезает. Это может привести к «фумигации» (перемешиванию) загрязняющих веществ, поскольку загрязнения, попавшие в течение ночи в верхние слои воздуха, опускаются вниз. Таким образом, в околополуденные часы, предшествующие полному развитию турбулентности, часто возникают высокие концентрации атмосферных загрязнений.

Вышеописанные закономерности формирования инверсий могут изменяться в случае появления облачности или выпадения осадков, которые, как известно, снижают интенсивность конвекции днем и ослабляют инверсии ночью.

Характер снижения температуры воздуха с высотой в городских районах, где чаще всего наблюдается загрязнение атмосферного воздуха, особенно в ночное время, отличается от такового на открытых территориях.

Промышленные выбросы, повышенное выделение тепла в городских районах и неоднородность поверхности, создаваемая разновысотными зданиями, способствуют термической и механической турбулентности, которые усиливают перемешивание воздушных масс и препятствуют образованию приземной инверсии. Благодаря этому нижняя граница инверсии находится здесь над слоем интенсивного перемешивания и имеет мощность от 30 до 150 м. Такие условия в городах могут ослаблять преимущества выбросов посредством высоких источников, так как загрязняющие вещества при этом будут концентрироваться в относительно ограниченном пространстве.

По данным И. А. Карловича (2013), содержание загрязняющих веществ в атмосфере зависит от вертикальной протяженности (мощности) и интенсивности инверсий. Так, по мнению автора, с увеличением вертикальной протяженности инверсии от 100 до 600 м концентрация сернистого газа в среднем возрастает в 3 раза, а пыли – в 1,7 раза.

Знание высоты расположения инверсионного слоя позволяет определить местоположение повышенных концентраций загрязняющих веществ, которые, как правило, наблюдаются на высоте верхней границы инверсии (Ежегодник..., 2011).

В течение всего года приземные инверсии в ночное время наблюдались в 2–3 раза чаще, чем в дневное. У приподнятых инверсий подобных различий не выявлено.

Авторы обнаружили также различия в средней мощности между приземными и приподнятыми инверсиями, которая у приземных инверсий оказалась больше, особенно в ночное время.

По интенсивности приземные и приподнятые инверсии в Санкт-Петербурге не отличались. При этом интенсивность ночных инверсий оказалась выше дневных. В данном случае более интенсивными оказались ночные приземные инверсии. Для приземных и приподнятых инверсий авторами была установлена значимая корреляционная связь между их мощностью и интенсивностью.

По данным СибНИГМИ (Отчет о НИР..., 2014), связь загрязнения атмосферного воздуха с устойчивостью атмосферы целесообразно изучать с учетом скоростей ветра. При этом рядом исследователей выделяется три основных типа сочетания инверсий со скоростью ветра.

1. Загрязнение воздуха в наибольшей степени зависит от температурной стратификации только при очень слабых ветрах 0–1 м/с. При таком сочетании скорости ветра и устойчивости атмосферы в основном происходит увеличение концентраций примесей в атмосферном воздухе.

2. При умеренных ветрах 4–6 м/с даже с усилением устойчивости атмосферы (увеличение мощности и интенсивности инверсий) загрязнение воздуха снижается.

3. При сильных ветрах выше 6 м/с связь между загрязнением воздуха и атмосферной устойчивостью практически отсутствует.

По наблюдениям СибНИГМИ (Отчет о НИР..., 2014), температура воздуха существенно влияет на годовой ход его загрязнения. Так, в летний период года высокая температура воздуха усиливает интенсивность испарения летучих веществ и может вызвать повышение их

концентраций. В зимний период, когда наблюдаются отрицательные температуры воздуха, имеет место увеличение объемов сжигаемого топлива и, как следствие, выбросов в атмосферу продуктов их неполного сгорания (оксида углерода, сернистого ангидрида, оксидов азота), что также вызывает повышение загрязнения атмосферы.

При этом теми же авторами выделяется два основных класса веществ в зависимости от периода наступления максимальных значений концентраций в годовом цикле для территории Западной Сибири (Отчет о НИР..., 2014). У одного класса веществ максимальные концентрации наблюдаются зимой во время отопительного сезона, а также в период большой повторяемости неблагоприятных условий для их рассеивания в приземном слое воздуха. У другого класса веществ максимальные концентрации наблюдаются летом, чему способствует химическая и фотохимическая активность атмосферы, а также высокая степень испаряемости при высоких температурах воздуха. Наряду с этим выделен ряд загрязняющих веществ, у которых максимальные среднемесячные концентрации наблюдаются обычно в переходные периоды – весной или осенью.

В табл. 2.1 приведен перечень загрязняющих веществ разных классов по времени наступления максимальных среднемесячных концентраций в годовом ходе в условиях континентального климата Западной Сибири, по данным СибНИГМИ (Отчет о НИР..., 2014).

Таблица 2.1

Классификация загрязняющих веществ по времени наступления максимальных среднемесячных концентраций
(по данным СибНИГМИ)

Загрязняющие вещества 1-го класса с максимальными концентрациями в холодный период года	Загрязняющие вещества 2-го класса с максимальными концентрациями в теплый период года
Сернистый ангидрид Оксид углерода Диоксид азота Оксид азота Сажа Бензапирен	Взвешенные вещества Формальдегид Фенол Озон Хлористый водород Аммиак Фтористый водород Сероводород

Как следует из табл. 2.1, к 1-му классу веществ относятся сернистый ангидрид, оксид углерода, диоксид и оксид азота, сажа, бензапирен. Максимальные концентрации в атмосферном воздухе у них наблюдаются, как правило, зимой, а минимальные – летом (с увеличением температуры воздуха происходит уменьшение среднемесячных концентраций).

К загрязняющим веществам 2-го класса отнесены формальдегид, фенол, озон и др. У них максимальные концентрации наблюдаются летом, что связано с увеличением температуры воздуха в этот период. Характерно, что к 2-му классу относится гораздо большее количество веществ, причем специфических, выбросы которых незначительны, но сами эти вещества гораздо более опасны для здоровья населения по сравнению с веществами 1-го класса. Вместе с тем время жизни в атмосфере веществ 2-го класса относительно невелико и изменяется от нескольких минут (аммиак) до нескольких часов (формальдегид).

Вещества первого класса, хотя и включают меньшее количество ингредиентов, но их выбросы составляют примерно две трети выбросов в городе, что делает их более значимыми при оценке общего уровня загрязнения атмосферы. Время жизни этих веществ в атмосфере (Бримбкунб, 1988; Исидоров, 2001; Скудневская, Дульцева, 1994) может составлять от нескольких суток (сернистый ангидрид – от 1,5 до 7 сут, бензапирен, сажа и мелкодисперсная пыль – от 7 сут до нескольких месяцев; диоксид азота – от 7–10 ч до 4 сут) до нескольких лет (оксид углерода – от 2–4 мес. до 5 лет).

Влияние температуры воздуха на уровень загрязнения атмосферы также опосредованно связано с состоянием растительного покрова и его биомассой. Как известно, формирование биомассы растительности происходит при температурах не ниже 5 °С и не выше 50 °С. Наиболее благоприятные условия для формирования биомассы складываются в вегетационный период, когда среднесуточные температуры воздуха превышают 10 °С. Кроме этого, важной характеристикой термических условий вегетационного периода является показатель суммы активных температур. Чем выше сумма активных температур, тем формируются более благоприятные условия для роста биомассы растений. Однако необходимо также принимать во внимание комплексный показатель оценки термических ресурсов и условий увлажнения, выражаемый гидротермическим коэффициентом (ГТК) Г. Т. Селянинова (Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь. Том 1, 2008). Наиболее благоприятные условия для формирования растительной биомассы складываются при оптималь-

ном соотношении суммы осадков, выпавших за вегетационный период, и суммы активных температур, соответствующих значениям ГТК от 1,1 до 2,0. При значениях ГТК менее 1,0 наблюдаются засушливые условия с избытком тепла и недостатком влаги, при ГТК более 2,0 – избыточно влажные условия с недостатком тепла и избытком влаги. При недостатке и при избытке влаги происходит обеднение биомассы растительности.

Биомасса растительности в целом и прежде всего биомасса ассимиляционного аппарата растений является естественным поглотителем загрязняющих веществ. По данным Г.М. Илькуна (1982), листовое насаждение с запасом биомассы листьев 4 т/га в течение периода вегетации способно поглотить порядка 10 т пыли и вредных газов.

Например, в условиях Крайнего Севера, где наблюдаются суровые природно-климатические условия и короткий вегетационный период с низкими значениями суммы активных температур, формируется очень бедный растительного покров, который не способен активно поглощать загрязняющие вещества из атмосферы. Таким образом, проявляется связь климата с условиями для очищения атмосферы растительностью. Эти условия будут тем хуже, чем ниже среднегодовая температура воздуха и, как следствие, беднее местная растительность.

Вопросы, касающиеся оценки влияния метеорологических факторов на загрязнение атмосферы в районах Крайнего Севера, в научной литературе в настоящее время освещены слабо. Любая информация, посвященная данной тематике, вызывает большой интерес. Так, в работе Е. О. Луценковой и А. П. Хаустова (2009) представлены результаты оценки влияния метеорологических условий на распространение загрязняющих веществ в атмосфере на территории Ямало-Ненецкого автономного округа в районе пос. Ямбург – одном из ключевых пунктов инфраструктуры крупной газодобывающей компании ООО «Газпром добыча Ямбург».

В указанной работе приведены результаты наблюдений за концентрациями вредных веществ, проводившихся в 2004 г. в пос. Ямбург на введенном в опытную эксплуатацию модернизированном посту экологического контроля «ДАПЭК 10.0000.0». Наблюдения заключались в проведении каждые 20 мин одновременных замеров концентраций загрязняющих веществ (окислов азота, углеводородов, оксида углерода, озона) и метеорологических параметров (температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра, атмосферного давления, а также экспозиционной дозы).

Всего было выполнено порядка 500 тыс. парных замеров в разное время года. На основании полученных данных был проведен регрессионный анализ зависимости концентрации загрязняющих веществ от метеорологических условий. В результате было установлено, что в большинстве случаев связь концентрации загрязняющего вещества y и метеопараметра x лучше всего описывается уравнением логарифмической функции

$$y = a \ln(x) + c. \quad (2.1)$$

В отдельных случаях указанная связь может быть описана и линейными и экспоненциальными уравнениями.

Авторы публикации установили, что содержание загрязняющих веществ зависит от различных метеорологических факторов. Содержание углеводородов в наибольшей степени коррелировало с температурой воздуха, а уже затем с влажностью воздуха и атмосферным давлением. На содержание окислов азота (NO_x) больше всего повлияли температура воздуха и скорость ветра, на содержание угарного газа (CO) – температура воздуха и направление ветра. Концентрация озона находилась в наиболее тесной связи от температуры и влажности воздуха.

При этом показателем, с которым наблюдалась наиболее тесная связь в течение всего года, является температура воздуха.

Отсюда следует, что учет термического фактора крайне необходим при разработке комплексных показателей метеорологического потенциала атмосферы.

Проведенные исследования СибНИГМИ в условиях Западной Сибири (Отчет о НИР..., 2014) показали, что влияние температуры воздуха на формирование уровня его загрязнения носит двоякий характер. Например, для основных загрязняющих веществ (CO , NO_2 , SO_2 , сажа, бенз(а)пирен) с большим валовым объемом выбросов и продолжительным периодом жизни в атмосфере с понижением температуры воздуха их концентрации увеличиваются. Для других специфических загрязняющих веществ с малым валовым объемом выбросов и быстрым циклом химического преобразования в атмосфере в другие загрязняющие вещества, более опасные для здоровья населения, с понижением температуры воздуха их концентрации понижаются.

Данные СибНИГМИ (Отчет о НИР..., 2014) констатируют, что более опасными для формирования высокого уровня загрязнения атмосферного воздуха являются низкие температуры. Проведенные

исследования на территории Сибири позволили авторам сделать предположение, что локальное повышение среднегодовой температуры приводит к снижению роста концентраций некоторых загрязняющих веществ, в частности диоксида азота, даже несмотря на рост количества автотранспорта. В то же время локальное понижение среднегодовой температуры приводит к обратной тенденции увеличения роста концентрации диоксида азота. Вместе с тем авторы отмечают, что влияние температуры воздуха на формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха имеет сложный характер и не всегда представляется возможным его выделить из комплекса других факторов.

В последнее время в ряде работ (Безуглая, Смирнова, 2008; Безуглая, Воробьева, Ивлева, 2012) проводится параллель между потеплением климата и увеличением *химической активности атмосферы*, под которой, в свою очередь, понимается способность достаточно быстро перерабатывать поступающие в нее загрязняющие вещества.

При этом химическую активность атмосферы предложено выражать через коэффициент трансформации (KT), представляющий собой отношение вторичного продукта (например NO_2) к исходному продукту (NO_x). Отсюда KT можно представить в виде следующей формулы:

$$KT = NO_2 / NO_x, \quad (2.2)$$

при этом $NO_x = NO_2 + NO$.

Исследованиями СибНИГМИ установлено, что величины KT под влиянием ряда факторов претерпевают значительные колебания от 0 до 0,6–0,7. К таким факторам можно отнести концентрации NO , типы промышленных предприятий, параметры выбросов, метеорологические и физико-географические условия местности и др.

Химическая активность атмосферы отмечается тем выше, чем больше коэффициент трансформации. По данным наблюдений, за последние годы средние значения KT возросли на 10–60 %, что характеризует усиление атмосферой своей защиты от загрязнения.

Одним из ключевых показателей загрязнения атмосферы является *индекс загрязнения атмосферы (ИЗА)*, для расчета которого согласно РД 52.04.667-2005 используются средние значения концентраций различных загрязняющих веществ, деленные на их ПДК и приведенные к вредности диоксида серы. Между $ИЗА$ и KT наблюдается обратная связь средней тесноты (коэффициент корреляции 0,55).

На устойчивость инверсий может оказать существенное влияние солнечная радиация, что целесообразно использовать для борьбы с ними. Интересный метод рассеивания инверсионного слоя с целью борьбы с загрязнением воздуха описан в работе монгольского ученого Н. Сайжаа (2004). Метод основан на интенсификации восходящих потоков воздуха, способствующих рассеиванию инверсионного слоя. Суть его заключается в применении гигантских линз Френеля диаметром 15 м. Линза Френеля – это оптическая деталь со сложной ступенчатой поверхностью. Подобного рода линзы были предложены французским физиком и инженером Огюстеном Жаном Френелем в 1823 г. для морских маяков. С помощью такой линзы свет маяка был замечен на расстоянии до 32 км. Подобного рода линзы считаются более эффективными для усиления светового потока по сравнению с обычными линзами. В фокусе гигантской линзы Френеля диаметром 15 м, по данным Н. Сайжаа (2004), температура может достигать 3500°C . Таким образом, получается своего рода мощный концентратор солнечной радиации, который способствует эффективному прогреву воздуха у земной поверхности и, как следствие, формированию мощных восходящих потоков. Так, при величине солнечной радиации 120 Вт/м^2 такой солнечный концентратор может создавать поток теплого воздуха объемом 220 тыс. м^3 . Использование нескольких таких концентраторов в виде линз Френеля на территории крупного города может способствовать рассеиванию инверсионного слоя, что, в свою очередь, приводит к рассеиванию загрязняющих веществ ветром.

2.3. Влажность воздуха

Между влажностью воздуха и его загрязнением также установлена некоторая связь. Например, по данным В. Фетта (1961), при увеличении относительной влажности наблюдается увеличение концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.

Уровень загрязнения воздуха при прочих равных условиях будет коррелировать с суточным и годовым ходом относительной влажности. Поскольку минимальное значение относительной влажности воздуха наблюдается в суточном ходе около 14–16 часов, а в годовом ходе – с мая по сентябрь, соответственно, минимальное содержание примесей в атмосфере будет отмечаться в этот же период. Максимальные значения относительной влажности воздуха наблюдаются в суточном ходе обычно ночью и около восхода солнца, а в годовом

ходе – зимой, соответственно, максимальное содержание загрязняющих веществ будет отмечаться в этот же период.

Изменение величины относительной влажности косвенно отражает условия температурной стратификации (преимущественно устойчивой зимой и ночью и неустойчивой летом в дневные часы) и, как следствие, интенсивность вертикального перемешивания воздуха. Связь между содержанием в воздухе загрязняющих веществ и его относительной влажностью в основном проявляется через температуру. Например, чем выше относительная влажность воздуха, тем, как правило, ниже температура и тем чаще наблюдается приземная инверсия, способствующая накоплению загрязняющих веществ в некотором слое. Таким образом, существует прямая зависимость между содержанием поллютантов и величиной относительной влажности воздуха.

2.4. Туманы

Туманы являются одним из важных метеоэлементов, влияющих на степень прозрачности атмосферы, а также на характер накопления и рассеивания загрязняющих веществ.

Загрязнение атмосферы примесями антропогенного происхождения влияет на степень прозрачности атмосферы и дальность видимости. Поступление в атмосферный воздух примесей приводит к снижению дальности видимости, росту повторяемости *дымок* (видимость от 1 до 10 км) и уменьшению числа дней с хорошей видимостью (более 10 км). По данным Л. Т. Матвеева (1984), повторяемость дымок в Санкт-Петербурге наблюдалась примерно в 2 раза больше, чем в окрестностях города на расстоянии 70–80 км.

Между туманами и загрязнением приземного слоя воздуха отмечается определенная связь. Дальность видимости в туманах составляет менее 1 км. По данным Л. Т. Матвеева (1984), в больших городах туманы образуются значительно реже, чем в их окрестностях (в 2–3 раза). Основную роль в уменьшении повторяемости туманов в городах играет более высокая температура воздуха в них по сравнению с таковой в окрестностях. Для возникновения тумана в городе температура должна опуститься значительно ниже точки росы. Вместе с тем туманы в городе рассеиваются также быстрее, чем в окрестностях.

Содержание и распределение загрязняющих веществ в туманах подчиняется сложным закономерностям, поскольку для туманов характерны свои специфические метеоусловия (инверсии, штиль или слабый ветер), в той или иной степени способствующие накоплению

примесей в приземном слое. Кроме того, в туманах наблюдается поглощение загрязняющих веществ каплями воды, которые накапливаются в приземном слое воздуха. В случае растворения поллютантов в каплях тумана могут образовываться новые загрязняющие вещества.

Существенная разница концентраций загрязняющих веществ в туманах и вне их способствует переносу примесей из окружающего воздуха в область тумана, в итоге концентрация примесей в тумане еще более возрастает. Такой эффект может наблюдаться в случае расположения над слоем тумана дымового факела. В результате происходит накопление выбросов в приземном слое воздуха.

По данным В. Фетта (1961), при появлении тумана запыленность воздуха обычно сильно возрастает.

По данным М. Е. Берлянда (1985), осаждение водяных капель в туманах на частицах аэрозолей приводит к увеличению их размеров и гравитационному осаждению на земную поверхность.

При низких температурах воздуха в холодный период года формируются ледяные туманы, характерные в основном для районов страны с холодной зимой. Образованию таких туманов способствует интенсивное поступление в воздух выбросов автотранспорта, наиболее интенсивное в утренние часы. К подобному эффекту приводят также выбросы теплоэлектростанций и теплоцентралей, вызывающие аккумуляцию в ледяных туманах сернистого ангидрида. При этом чем ниже температура воздуха, тем интенсивнее наблюдается указанный эффект.

Как отмечено М. Е. Берляндом (1985), растворенный в каплях тумана сернистый газ гораздо быстрее, чем в газообразном состоянии, окисляется до сернистого ангидрида. Такое свойство тумана обусловлено содержанием в каплях тумана некоторых микроэлементов, обладающих свойствами катализаторов, усиливающих процессы окисления. Например, содержание в тумане некоторых тяжелых металлов, таких как марганец, медь, железо, а также аммиака способствует ускорению окисления сернистого газа.

Поскольку известно, что сернистый ангидрид при взаимодействии с водой образует серную кислоту, при окислении сернистого газа в атмосфере до сернистого ангидрида в присутствии большого количества водяного пара, по сути, происходит образование серной кислоты в виде аэрозоля.

По мнению М. Е. Берлянда (1985), «для количественной оценки влияния тумана на характер загрязнения воздуха необходимо знать радиус капель тумана и его водность, а также распределение этих ха-

рактических в пространстве. При этом стоит учитывать, что в тумане происходит перестройка профилей температуры и коэффициента обмена».

Условия распространения примесей в речных и радиационных туманах изучались М. Е. Берляндом и другими авторами (Берлянд, Оникул, 1968; Берлянд, Канчан, 1973). Согласно проведенным ими расчетам в развитом радиационном тумане происходит разрушение приземных инверсий и образуются приподнятые инверсии температуры, что в итоге приводит к увеличению концентраций загрязняющих веществ в приземном слое.

Капли тумана почти полностью поглощают поступающие от источника выброса загрязняющие вещества. На расстоянии 0,5 км от источника выброса высотой 100 м концентрация газообразной примеси будет близка к нулю.

В случае речных и радиационных туманов повышенные концентрации загрязняющих веществ могут наблюдаться не только на различной высоте в слое тумана, но и в слое воздуха, расположенном над туманом.

Характерно, что при образовании тумана в его каплях накапливаются не только загрязняющие вещества, находившиеся у подстилающей поверхности до начала его формирования, но и значительная часть примесей из вышележащих слоев (нередко даже более загрязненных). Капли тумана способны аккумулировать примеси из достаточно протяженных по вертикали слоев воздуха, что приводит к существенному увеличению суммарного загрязнения воздуха у подстилающей поверхности.

М. Е. Берляндом (1985) было предложено понятие «*полной концентрации*», которая находится по формуле

$$q_n = q + q_m, \quad (2.3)$$

где q_n – полная концентрация примеси;

q – концентрация примеси в воздухе;

q_m – концентрация примеси в каплях тумана, пересчитанная на единицу объема воздуха.

Туманы усиливают накопление в атмосфере загрязняющих веществ, обусловленное слабыми ветрами и инверсиями.

Определенную роль в распространении загрязняющих веществ играет гравитационное оседание капель тумана на подстилающую поверхность. При этом происходит перенос примеси загрязняющих

веществ из вышележащих слоев на земную поверхность. Такой процесс напоминает кислотный дождь.

В случае инверсии содержание в тумане загрязняющих веществ может увеличиваться на 20–30 % по сравнению с ее отсутствием. С течением времени эта разница увеличивается и через 6 ч после образования тумана может достигать 30–60 %.

Туманы могут оказывать достаточно сложное влияние на содержание загрязняющих веществ, поскольку их образование способствует также изменению вертикального градиента температуры с высотой и формированию приподнятых инверсий, изменению прозрачности приземного слоя воздуха и условий его прогрева.

Поглощение загрязняющих веществ каплями тумана может способствовать образованию более опасных по сравнению с исходными веществ.

Наблюдения за повторяемостью периодов интенсивного загрязнения воздуха показывают наличие их корреляции с периодами продолжительных туманов.

Вредное воздействие загрязняющих веществ на человека при туманах ощущается более остро, чем при иных погодных условиях.

Содержание в туманах загрязняющих веществ способствует дополнительному ухудшению в них видимости. В то же время имеет место и обратный эффект, когда поступающий в переувлажненный атмосферный воздух дым способствует усилению конденсации водяного пара и приводит к образованию тумана.

Сернистый газ является одним из распространенных загрязнителей атмосферного воздуха. Растворение сернистого газа в каплях тумана приводит к образованию аэрозоля сернистой кислоты, обладающей по сравнению с сернистым газом большей токсичностью для живых организмов. Кроме того, сернистая кислота в атмосфере может способствовать процессам коррозии металлов и являться косвенной причиной разрушения металлоконструкций. Обнаружить сернистую кислоту в опасном количестве возможно только в туманах.

С учетом вышеизложенного при проектировании жилых комплексов и промышленных предприятий необходимо учитывать фактор туманообразования в районах будущего строительства.

Например, для промышленных городов, расположенных в долинах крупных незамерзающих рек, зимой характерны частые туманы, которые не только ухудшают видимость и затрудняют движение автотранспорта и работу авиации, но еще и способствуют дополнительному загрязнению воздуха.

Для речных туманов характерно наибольшее поглощение значительной части загрязняющих веществ непосредственно над рекой и вблизи береговой линии. Это объясняется максимальной водностью туманов в этих местах.

Следует учитывать, что риск возникновения речных туманов при отрицательных температурах воздуха усиливается над открытыми, длительное время не замерзающими участками воды. Такие участки образуются вблизи речных плотин и на отрезках водотоков, где регулярно сбрасываются промышленные и хозяйственно-бытовые сточные воды с температурой, превышающей температуру водоемов, а также на охлаждающих каналах тепловых электростанций и иных промышленных объектов.

Принимая во внимание имеющуюся информацию, при градостроительном проектировании необходимо учитывать риски увеличения загрязненности приземного слоя воздуха при застройке районов, в которых регулярно наблюдаются речные туманы.

Туманы, содержащие загрязняющие вещества, называются *смоги*. Со смогами связано особо опасное загрязнение воздуха, нередко способствующее росту заболеваемости и смертности населения.

Смог представляет собой одну из разновидностей дымок. Его отличительной особенностью является коричневатый оттенок, который придают окислы азота, входящие в состав пероксиацетилнитрата (ПАН) – главной составляющей смога. ПАН образуется в результате воздействия солнечной радиации (преимущественно ультрафиолетовых и фиолетовых лучей) на углеводороды и окислы азота, выбрасываемые в атмосферу при сжигании топлива. Продуктом химических реакций окислов азота и углеводородов является также озон. В целом количество химических реакций, приводящих к образованию фотохимического смога, достаточно велико, а сами они могут быть весьма сложными.

Различают два основных типа смогов: лондонский и лос-анджелесский.

Лондонский тип смога (или дымотуманный) образуется в основном в зимний период при возникновении туманов и слабом ветре, дующем со стороны промышленных районов. Типичен для Лондона. По данным Маккормика (McCormik, 1970), в Лондоне смоги в основном наблюдаются в декабре-январе в утренние часы при штиле и температуре воздуха от -1 до $+4$ °C и относительной влажности воздуха выше 85 %. Дальность видимости в таком смоге иногда составляет менее 30 м. Основной источник загрязнения воздуха при этом типе

смога – продукты неполного сгорания угля и мазута. В лондонском смоге интенсивно протекает процесс взаимодействия тумана с различными загрязняющими веществами, такими как угарный газ (CO), оксиды серы (SO_2), в результате чего происходит поглощение этих веществ каплями тумана (Stephens E. R., 1969).

Лос-анджелесский тип смога (или фотохимический) возникает в результате фотохимических реакций при следующих условиях: высокое содержание в атмосфере окислов азота, углеводородов и других загрязняющих веществ, интенсивная солнечная радиация, штиль или слабый ветер в приземном слое, мощная продолжительная (не менее одних суток) приподнятая инверсия. Обязательным условием будет являться устойчивая безветренная погода с инверсиями, способствующая формированию высокой концентрации вышеперечисленных загрязняющих веществ. Такой тип смога характерен для г. Лос-Анджелеса, где вышеперечисленные условия создаются чаще всего в августе-сентябре в середине дня при скоростях ветра менее 3 м/с, температуре воздуха 24–32 °С и относительной влажности воздуха менее 70 %. Дальность видимости в таком смоге может составлять от 1,5 до 8 км. Основным источником выбросов, способствующим образованию такого типа смога, является автотранспорт.

Продолжительная ясная погода с высокой интенсивностью солнечной радиации способствует расщеплению молекул диоксида азота, в результате чего образуются оксид азота и атомарный кислород. По мнению некоторых авторов (Берлянд, 1985), фотохимические реакции начинаются, когда значение суммарной солнечной радиации, достигающей подстилающей поверхности, превышает 0,5 кал/ (мин · см²).

Атомарный кислород (O), взаимодействуя с молекулярным кислородом (O_2), приводит к образованию озона (O_3). Оксид азота, вступая в химические реакции с углеводородами этиленового ряда (или олефинами), поступающими в приземный слой при неполном сгорании топлива автотранспорта, также приводит к образованию дополнительного количества озона. По сути, возникает циклическая химическая реакция, в результате которой в атмосфере постепенно накапливается озон. В ночное время данный процесс прекращается. Озон также может вступать в реакцию с олефинами. В результате в атмосфере накапливаются различные перекиси, представляющие собой характерные для фотохимического смога вещества – оксиданты. Оксиданты, в свою очередь, являются источником свободных радикалов, обладающих высокой реакционной способностью, что делает их весьма опасными. Свободные радикалы легко вступают в химическую

реакцию с другими веществами, приводящую к образованию новых, часто весьма токсичных веществ.

Осуществлять контроль содержания в атмосферном воздухе ПАН существующими на сегодня методами достаточно сложно, поэтому на практике интенсивность смога характеризуют по концентрации в нем озона. Слабый смог, как правило, уже наблюдается при концентрации озона 0,2–0,35 мг/м³.

Подвергаясь в атмосферном воздухе конденсации, ПАН может осаждаться на земную поверхность в виде клейкой токсичной для человека и растений жидкости.

Негативное воздействие смога на человека проявляется прежде всего в различных заболеваниях глаз, дыхательных путей, а также других органов.

Для образования фотохимического смога необходим интенсивный поток солнечной радиации, а также большое количество выбросов автотранспорта, приводящее к высокому содержанию окислов азота и углеводородов.

По визуальным признакам смог отличается от дымки характерным коричневатым оттенком, тогда как последняя имеет обычно серый или сине-голубой цвет.

Относительная влажность в смогах в отличие от дымок невысокая, что делает их похожими на мглу – явление снижения видимости под влиянием твердых слабо обводненных примесей (например сажи при пожарах).

Дальность видимости в смогах изменяется в широких пределах, но в целом она меньше 10 км.

Фотохимические смоги преимущественно наблюдаются в городах, расположенных в низких широтах, поскольку там больше солнечной радиации. Например, в Лос-Анджелесе смоги наблюдаются более 200 дней в году (Feigley C. et al, 1983; Матвеев, 1984). Часто повторяются смоги в других городах США, а также в городах Мексики, Японии, Турции, Франции, Испании, Великобритании, Китая и ряда других стран.

Влажные смоги связаны с туманами, при которых в течение продолжительного времени удерживаются высокие концентрации вредных примесей.

Для целого ряда промышленных городов характерно также присутствие в смоге серной кислоты. Такие смоги называют иногда серно-кисотно-сульфатными (Берлянд, 1985).

2.5. Осадки

Осадки – основной метеорологический элемент, способствующий удалению из атмосферы загрязняющих веществ. Эффективность очищения воздуха от примесей путем вымывания их осадками зависит преимущественно от количества выпавших осадков и продолжительности их выпадения.

Ещё В. Феттом (1961) отмечено, что перед началом или в начале ливня или снегопада содержание пыли в приземном слое атмосферы повышается вследствие оседания ее из верхних слоев. Впоследствии запыленность уменьшается благодаря преобладающему влиянию вымывания пыли осадками и притока чистого воздуха. После продолжительного дождя содержание пыли бывает понижено и поэтому считается, что выпадение осадков очищает атмосферу.

Интересные выводы были получены Шоу и Оуэнсом (Shaw, Owens, 1925), которые отмечали, что дождь вымывает из атмосферы только растворимые компоненты загрязнений. Остальная пыль почти не вымывается, так как перед падающей каплей образуется уплотненный слой воздуха, оттесняющий мелкие нерастворимые частицы и не допускающий их соприкосновения с каплей. Таким образом, эта часть пыли оседает только под действием потоков воздуха.

Наибольшая загрязненность воды отмечается в начале дождя (первые потоки с крыш обычно сильно загрязнены также за счет старых отложений пыли).

Летом дождевая вода содержит большое количество органических веществ (цветочной пыльцы, остатков мелких насекомых), которые быстро загнивают.

По данным В. Фетта (1961), в 1 м³ дождевой воды содержится до 50 г примесей. В то же время в каплях тумана, по мнению того же автора, находят значительно больше твердых частиц, чем в дождевой воде.

Пыль способна перемещаться на значительные расстояния. Так, по некоторым данным, пыль из пустыни Сахара может оседать на территории Европы вместе с осадками.

Кроме того, пыль иногда является причиной выпадения так называемых необычных дождей. К последним В. Фетт (1961) относил:

1) пыльный дождь – выпадение коричневой пыли с дождем или без него;

2) грязевой дождь – большей частью вулканического происхождения;

3) чернильный дождь – дождь, окрашенный пылью в черный цвет;

4) кровавый дождь – дождь, окрашенный пылью в темно-красный цвет;

5) кровавый снег – снег, окрашенный пылью в красный цвет. Причиной окрашивания могут служить водоросли (*Sphaerella nivalis*) или инфузории (*Discogaea nivalis*);

6) серный дождь – весенний дождь, смывающий цветочную пыльцу, которая окрашивает лужицы в желтый цвет;

7) манный, или персидский, дождь (маннатау) – дождь, вымывающий частицы лишайника *манна*, который используется на Ближнем Востоке и в Северной Африке для выпечки хлеба. Благодаря слабому закреплению на сухом пустынном грунте этот лишайник легко отрывается ветром, поднимается в подоблачный слой с восходящими потоками воздуха, откуда вымывается осадками. С этим дождём связывают библейское выражение «манна небесная».

После выпадения осадков концентрация в атмосферном воздухе загрязняющих веществ достигает исходного значения примерно в течение 12 ч. Наиболее чистым воздух будет сразу после выпадения осадков. Степень очищения воздуха зависит от количества выпавших осадков (чем оно больше, тем воздух чище) и от условий выпадения осадков. Так, ливневые осадки очищают воздух лучше, чем обложные (Махонько, 1967).

Скорость снижения концентрации сернистого газа увеличивается с возрастанием интенсивности дождя. Концентрация диоксида азота так же, как и сернистого газа, уменьшается после выпадения осадков. Озон и другие окислители в летнее время сразу после дождя исчезают из загрязненного воздуха почти полностью (Горбаренко, Еремина, 1998). С учетом вышеизложенного при изучении условий формирования среднего уровня загрязнения атмосферного воздуха следует учитывать интенсивность и количество выпадающих осадков. Атмосферные осадки способствуют вымыванию примесей из атмосферы, а их интенсивность определяет скорость этого процесса.

Процесс вымывания различных примесей атмосферными осадками протекает по-разному. Вещества могут растворяться в каплях воды в процессе образования облаков, после чего происходит их трансформация в капли дождя. Далее с осадками растворенные примеси поступают на земную поверхность. Другой причиной вымывания вредных примесей из атмосферы является их «захватывание» пролетающими

каплями дождя и перенос на земную поверхность (Горбаренко, Еремина, 1998).

При расчете комплексных показателей загрязнения, описывающих метеорологические условия рассеивания примесей в атмосфере, важно правильно выразить влияние осадков на процесс очищения воздуха. Согласно исследованиям СибНИГМИ (Отчет о НИР..., 2014) в настоящее время существует два способа решения этой проблемы – через годовую сумму выпадающих осадков в том или ином районе или путем подсчета числа дней в году с выпавшими осадками выше определенного количества в миллиметрах.

В районах со значительным годовым количеством осадков наблюдаются лучшие условия для очищения атмосферного воздуха. Однако нерегулярность и неравномерность выпадения осадков на территории даже одного населенного пункта не всегда приводит к эффективному очищению воздуха. Учеными из СибНИГМИ была предложена методика, основанная на подсчете количества дней с осадками выше какого-то обоснованного минимального количества за сутки, которое способно очистить атмосферный воздух от загрязнителей (Отчет по НИР..., 2014). При этом могут быть использованы различные значения предельных осадков. Например, Т. С. Селегей (2005) в качестве искомой величины предложено использовать количество дней с осадками, выпавшими за сутки, 0,5 мм и более, которое, по мнению автора, способно очистить воздух от крупнодисперсной фракции пыли.

Л. П. Сорокина (1995) предложила использовать для расчетов число дней с осадками более 5 мм в сутки. Из приведенных примеров мы видим, что диапазон в суточном количестве осадков может различаться в 10 раз.

В ряде работ Т. С. Селегей с соавторами (Селегей, Филоненко, Ленковская, 2011; Формальдегидное загрязнение..., 2013) была проанализирована зависимость между количеством выпавших осадков за сутки и средними концентрациями некоторых загрязняющих веществ (взвешенные вещества, озон, формальдегид), а также была установлена примерно одинаковая картина очищения от них атмосферного воздуха. Как оказалось, наиболее эффективными для вымывания указанных загрязняющих веществ оказались обложные осадки интенсивностью 1–3 мм в сутки, в результате выпадения которых происходит уменьшение концентрации загрязняющих веществ в среднем на 20–25 %.

Осадки интенсивностью 4–10 мм в сутки зачастую носят кратковременный ливневый характер, поэтому при их выпадении отмечается

незначительное снижение концентраций загрязняющих веществ (примерно на 6–8 %), а осадки в количестве более 10 мм в сутки практически не влияют на содержание загрязняющих веществ. Как показали результаты исследований СибНИГМИ (Отчет о НИР..., 2014), такие интенсивные осадки в основном присущи малоподвижным барическим образованиям, имеют внутримассовый ливневый характер и часто охватывают локальные территории, например они могут выпадать в одной части города, не затрагивая другую.

При оценке годового количества осадков важно понимать, какое количество осадков, выпавших за год, гарантирует очищение атмосферного воздуха от загрязнителей. Данное количество осадков обычно находится в диапазоне от 300 до 400 мм.

А. П. Слядневым (1965) было выделено 6 геотермических зон увлажнения территорий, характеризующих возможности самоочищения геосистем в целом и в том числе и атмосферного воздуха. Граничные условия этих зон приведены в табл. 2.2, из которой следует, что минимальное количество осадков, обеспечивающее достаточное, хотя и неустойчивое увлажнение территорий и их способность к самоочищению, составляет 400 мм в год. На основании этого показателя можно оценить возможности самоочищения атмосферного воздуха за счет осадков на различных территориях.

Таблица 2.2

Геотермические зоны по А. П. Слядневу (1965)

Зона	Тип увлажнения	Годовое кол-во осадков, мм
1	Весьма скудное, устойчивая засушливость	Менее 250
2	Скудное, неустойчивая засушливость	250–300
3	Недостаточное и неустойчивое	300–350
4	Достаточное, но неустойчивое	350–400
5	Избыточное, устойчивое	400–500
6	Весьма избыточное	Более 500

По данным СибНИГМИ (Отчет о НИР..., 2014), осадки лучше всего очищают воздух от диоксида азота, а хуже всего от сажи, поскольку последняя представляет собой мелкодисперсную пыль и в целом плохо вымывается из атмосферы.

2.6. Ветер

Одним из важнейших метеорологических элементов, определяющих накопление и распространение загрязняющих веществ в атмосфере, является ветер, в том числе такие его характеристики, как направление, повторяемость ветров различных направлений, скорость, продолжительность ветров с различными скоростями. Также необходимо принимать во внимание влияние рельефа местности, стратификации атмосферы, циркуляции местных ветров и траектории воздушных потоков.

По данным справочника «Климатические характеристики...» (1983), ветер оказывает наиболее существенное влияние на перенос и рассеивание примесей в атмосфере. Особенно сильное влияние оказывают слабые ветры (0–1 м/с). На основе анализа повторяемости ветров со скоростью 0–1 м/с были выделены 4 географических района с различными значениями его повторяемости:

Районы	I	II	III	IV
Повторяемость слабых ветров, %	20 и менее	21–40	41–60	Более 60

На рис. 2.1 представлены районы с различной повторяемостью слабых ветров.

Как следует из рис. 2.1, большая часть европейской территории страны, Урал и Западная Сибирь относятся к II району. Северный Урал и север Западной Сибири отнесены к I району. Таким образом, для указанных территорий в целом характерна относительно невысокая повторяемость слабых ветров со скоростями 0–1 м/с (не более 40 %), что создает достаточно благоприятные условия для рассеивания примесей в атмосфере. Наибольшая повторяемость слабых ветров наблюдается в IV районе, куда относятся территория восточнее р. Лены в Якутии (район Оймякона) и два больших района вдоль Байкало-Амурской магистрали – на севере Забайкалья и в Амурской области. Здесь повторяемость слабых ветров достигает 70–77 % (Климатические характеристики..., 1983).

Распределение загрязняющих веществ в атмосфере существенно зависит от особенностей суточного и годового хода слабых ветров.

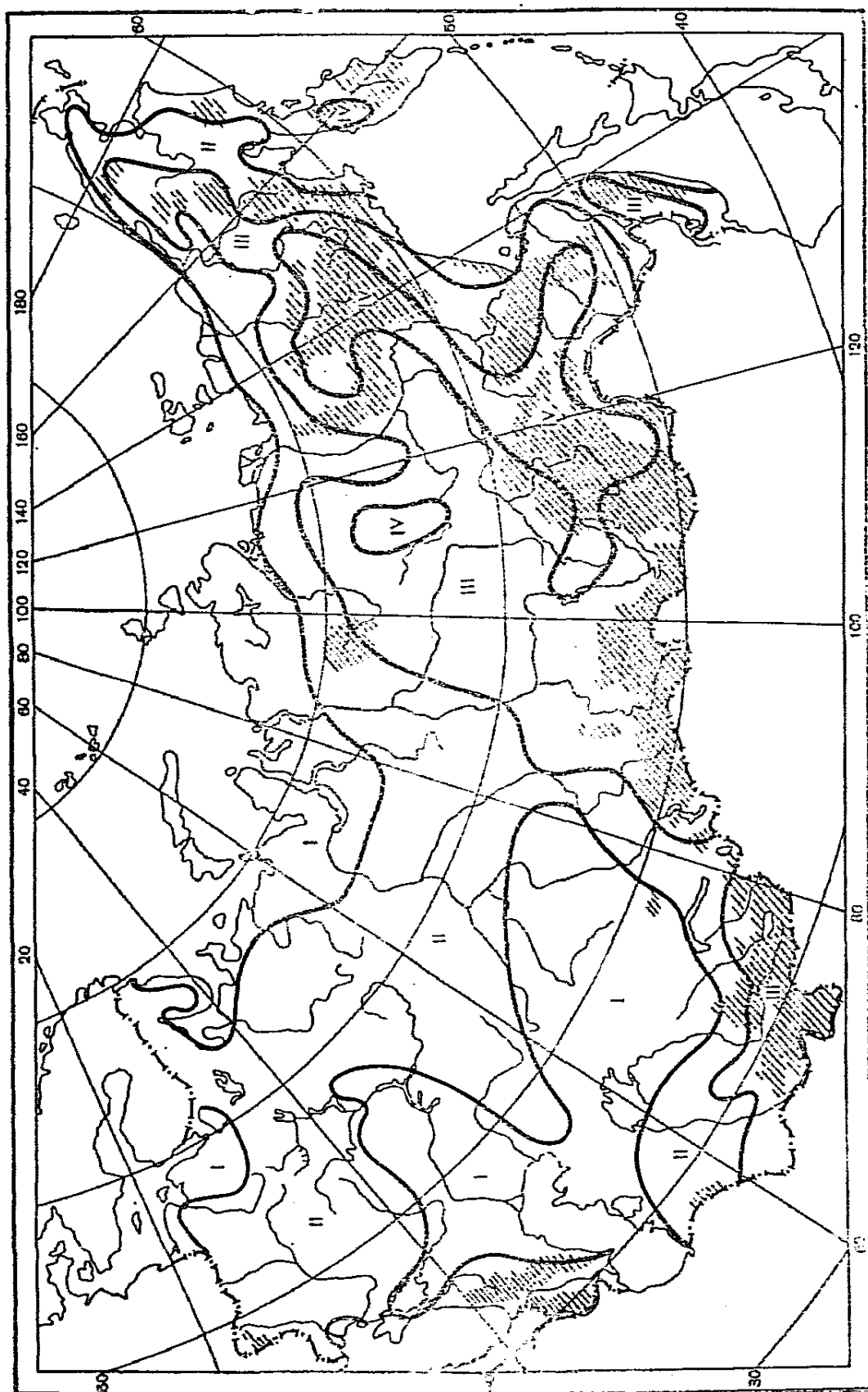


Рис. 2.1. Районы различной повторяемости слабых ветров (Климатические характеристики..., 1983):

I – IV – районы различной повторяемости слабых ветров

По данным справочника «Климатические характеристики...» (1983), над территорией страны имеются существенные различия в особенностях сезонных изменений повторяемости слабых ветров. Почти над всей европейской территорией страны автором отмечается плавное увеличение повторяемости слабых ветров летом по сравнению с таковой зимой. При этом максимум повторяемости на севере ЕТС наблюдается в июле, а на юге – в сентябре.

На сибирской территории страны от Урала до Енисея четко прослеживаются два максимума повторяемости слабых ветров (в июле-августе и декабре-январе) и два минимума (в мае и октябре).

Амплитуда суточного хода повторяемости слабых ветров весьма различна и зависит от времени года и географического положения метеостанции.

В табл. 2.3 приведены значения повторяемости слабых ветров на некоторых станциях в разное время суток, по данным Л. Е. Анапольской и Э. Ю. Безуглой (1974).

Суточный ход повторяемости скоростей ветра 0–1 м/с очень велик в переходные сезоны и летом. Данный фактор необходимо учитывать при прогнозировании наступления неблагоприятных метеорологических условий.

Таблица 2.3

Повторяемость слабых ветров, %, со скоростью
0–1 м/с (по данным Л. Е. Анапольской, Э. Ю. Безуглой, 1974)

Метеостанция	Январь		Июль	
	01 час	13 часов	01 час	13 часов
Архангельск	11,2	11,3	14,2	7,1
Москва	23,6	18,1	44,1	9,2
Одесса	3,4	3,5	6,4	5,5
Свердловск (Екатеринбург)	30,6	25,0	53,0	12,0
Целиноград	20,3	12,8	36,7	10,1
Сургут	26,7	15,2	35,9	4,7
Новосибирск	34,0	27,6	61,1	24,8
Иркутск	62,0	50,1	68,0	20,6

Анализ продолжительности слабых ветров, по данным справочника «Климатические характеристики...» (1983), показал, что продолжительные периоды слабых ветров обычно наблюдаются одновременно на нескольких метеостанциях, что связано в основном с малоподвижными антициклонами либо безградиентными полями атмосферного давления типа размытого антициклона или барической

седловины. Подобные ситуации могут служить одним из критериев повышенного загрязнения воздуха при макромасштабном прогнозировании. По данным того же справочника, на территории страны можно выделить четыре зоны с различной средней продолжительностью периодов слабых ветров. Характеристики этих зон представлены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Характеристики зон с различной продолжительностью периодов слабых ветров на территории СНГ
(«Климатические характеристики...», 1983)

Зона	Географические районы	Продолжительность периода со слабыми ветрами 0–1 м/с
I	Восточная Сибирь, Дальний Восток (за исключением побережий восточных морей)	До 25 дней в месяц
II	Западная Украина, внутренние районы Прибалтики, Белоруссия, Урал	1–5 дней в месяц
III	Восточная часть ЕТС, центральная и северная часть Западной Сибири	1 и менее дней в месяц
IV	Побережья северных и восточных морей, степная и лесостепная зоны ЕТС, Западной Сибири и Казахстана	1 раз в 3–5 лет

Направление ветра оказывает прямое влияние на загрязнение воздуха в городе. Отмечено, что значительное увеличение концентрации загрязняющих веществ в тех или иных районах города наблюдается в случае, когда преобладают ветры, дующие со стороны промышленных объектов, имеющих источники выбросов.

Важно также особо учитывать те направления ветра, которые определяют перенос примесей со стороны источника выбросов на близлежащие участки с плотной застройкой или сложным рельефом местности. В то же время особенности влияния направления ветра на загрязнение воздуха определяются целым рядом факторов, таких как размещение и параметры (высота и диаметр трубы, скорость выхода газозадушной смеси, состав и температура выбросов и др.) источников выбросов, рельеф, местная циркуляция. Наиболее опасными будут являться те направления ветра, при которых выбросы направлены с большого количества источников.

Важным параметром, влияющим на накопление и рассеивание загрязняющих веществ, является скорость ветра. Опасной считается скорость ветра на установленной высоте, при которой приземная концентрация от источника достигает максимума. Опасная скорость ветра зависит от параметров выброса. Для мощных источников (трубы теплоэлектростанций) ее значения составляют 5–7 м/с, для металлургических предприятий – 2–4 м/с, для химических производств, котельных и линейных источников – 1–2 м/с (РД 52.04.306-92, 1992).

Установлено, что в промышленном городе обычно наблюдается два максимума роста концентраций загрязняющих веществ: при скорости ветра 0–1 м/с за счет выбросов из многочисленных низких источников и при скорости ветра 4–6 м/с за счет выбросов из высоких источников. В связи с этим отмечается, что скорость ветра, способная вынести вредные вещества из города и разрушить «остров тепла» даже над мегаполисом с населением свыше одного миллиона человек, должна составлять не менее 6 м/с (Отчет о НИР..., 2014).

М. Е. Берляндом (1985) выявлены два максимума концентраций в зависимости от скорости ветра на уровне флюгера: при штиле и при скорости 4–7 м/с. При этом автором установлено, что во время штиля основную роль в загрязнении воздуха играют выбросы из низких источников. Это особенно заметно зимой. Второй максимум концентраций при скорости ветра 4–7 м/с наблюдается в основном летом, что связано с возникающими в этот период конвективными переносами порций воздуха, во время которых отмечено интенсивное перемещение выбросов от высоких источников сверху вниз.

Слабые ветры способствуют увеличению подъема выбросов, в результате чего загрязняющие вещества могут не достигать земной поверхности. Сильные ветры способствуют переносу примесей на значительные расстояния от источника выброса. Кроме того, принято выделять некоторую промежуточную скорость ветра, при которой дымовой факел может опускаться к земле и наблюдается эффект «задымления», а в приземном слое воздуха при этом формируется максимальный уровень загрязнения. Такую скорость ветра также называют «опасной». Значение «опасной» скорости ветра будет зависеть от высоты, скорости и температуры газовой смеси, вбрасываемой из источника. В случае выбросов из труб тепловых электростанций она составляет обычно 4–6 м/с.

Во время штиля может наблюдаться подъем перегретых выбросов от отдельных высоких источников в верхние слои атмосферы, где они рассеиваются. Свои коррективы в эти процессы вносит инверсия,

при наличии которой образуется препятствие для подъема выбросов в верхние слои атмосферы. В этом случае концентрация загрязняющих веществ в приземном слое может существенно увеличиться.

Согласно РД 52.04.306-92 (1992) для различных городов и сезонов года характерно снижение загрязнения воздуха с усилением скорости ветра при устойчивой стратификации. При неустойчивой стратификации для основных источников выбросов максимум загрязнения отмечается при скоростях ветра, близких к опасным.

Сочетание приземных инверсий температуры с низкими скоростями ветра 0–1 м/с способствует застою воздуха и представляет большую опасность. Под *застоем воздуха*, согласно РД 52.04.667-2005 (2005), понимается сочетание приземных инверсий температуры и слабой скорости ветра.

Анализ метеорологической информации и данных о концентрации примесей в городах, выполненный учеными СибНИГМИ (Отчет о НИР..., 2014), позволил обнаружить связь между сезонными колебаниями содержания загрязняющих веществ и повторяемостью скорости ветра 0–1 м/с. Были получены коэффициенты корреляции между повторяемостью скорости ветра 0–1 м/с и средней месячной концентрацией окислов азота, окиси углерода и сернистого газа, рассчитанные для 30 городов Восточной Сибири и Дальнего Востока, значения которых варьируют от 0,47 до 0,71, причем наиболее высокая корреляция обнаружена в городах с преобладанием источников выбросов с низкими трубами (Климатические параметры Восточно-Сибирского и Дальневосточного экономических районов..., 1979). Это показывает на необходимость изучения для городских условий прежде всего повторяемости скорости ветра 0–1 м/с.

В соответствии с вышеизложенным следует отметить важность ведения учета годового и суточного хода малых скоростей ветра. При этом известно, что годовой ход малых скоростей ветра достаточно сильно варьирует и определяется общим уровнем повторяемости этих скоростей. В районах с высокой повторяемостью ветра 0–1 м/с годовой ход скорости сглажен и колебания от месяца к месяцу в течение года составляют 5–10 %.

При оценке вероятности и характера распространения загрязняющих веществ, помимо годового хода скоростей ветра, целесообразно учитывать также его суточный ход, амплитуда которого зависит от времени года и географического положения района. Данные о суточном ходе различных скоростей ветра опубликованы в научно-прикладном справочнике «Климат России».

Как известно, скорость и направление ветра коррелируют с вертикальным и горизонтальным градиентами температуры воздуха. При этом чем больше скорость ветра, тем лучше развита турбулентность и тем эффективнее и быстрее происходит рассеивание загрязнений в атмосфере. Вертикальный и горизонтальный градиенты температуры зимой в умеренных широтах увеличиваются, при этом скорость ветра, как правило, возрастает. Это особенно характерно для умеренных и полярных широт и менее отчетливо проявляется в тропиках, где сезонные колебания вертикальных градиентов невелики. Однако иногда и в зимнее время, особенно в глубине крупных континентов, могут возникать продолжительные периоды слабого движения воздуха или полного штиля, что ухудшает условия для вертикального распространения атмосферных загрязнений. Последние рассеиваются медленно и могут концентрироваться в относительно малых объемах воздуха. Способствующий этому слабый изменчивый ветер может привести даже к обратному распространению загрязнений по направлению в сторону источника выброса. В противоположность этому в дневное время ветры характеризуются большей турбулентностью и скоростью. Вертикальные токи при этом усиливаются, поэтому в ясный, солнечный день происходит максимальное рассеивание загрязняющих веществ.

На характер рассеивания примесей будет оказывать влияние также вертикальная протяженность слоев со слабыми ветрами. Б. И. Вдовиным и А. М. Царевым (1969) было установлено, что мощные слои продолжительных слабых ветров образуются преимущественно в антициклоническом поле и гораздо реже в условиях заполняющихся циклонов. На территории СНГ значительная повторяемость штилевых слоев, благоприятствующая накоплению загрязняющих веществ в атмосфере, наблюдается в районах Восточной Сибири и Средней Азии.

На характер распространения примесей могут оказывать влияние местные ветры, в частности бризы и горно-долинные ветры, которые дополнительно способствуют рассеиванию загрязнения. Вместе с тем благодаря особенностям горно-долинной циркуляции в долинах может наблюдаться длительный застой воздуха, способствующий накоплению примесей. В целом местные ветры могут вносить свои особенности в характер рассеивания загрязняющих веществ.

Кроме того, в результате нагревания земной поверхности Солнцем образуются термические завихрения, максимальные у земной поверхности и убывающие с высотой, что приводит к уменьшению

порывистости ветра по вертикали и последовательному снижению скорости рассеивания загрязнений с увеличением высоты.

Эффективным механизмом, обеспечивающим рассеивание загрязняющих веществ в атмосфере, является турбулентность, которая делится на механическую и термическую. *Механическая турбулентность* возникает при движении ветра над аэродинамически шероховатой подстилающей поверхностью, она пропорциональна степени этой шероховатости и скорости ветра. *Термическая турбулентность* возникает в результате нагревания подстилающей поверхности Солнцем и зависит от широты местности, величины излучающей поверхности и устойчивости атмосферы. Максимум термической турбулентности наблюдается в ясные летние дни, минимум – зимними ночами.

На распространение загрязняющих веществ оказывают влияние также упорядоченные конвективные вертикальные перемещения воздуха, обусловленные неоднородностью подстилающей поверхности. В условиях пересеченной местности на наветренных склонах возникают восходящие, а на подветренных – нисходящие потоки воздуха. При нисходящих потоках приземные концентрации увеличиваются, при восходящих уменьшаются.

При анализе воздушных течений в большинстве случаев для удобства допускается, что ветер сохраняет постоянное направление и скорость на обширной территории в течение значительного периода. В действительности это не так, и при детальном анализе движения воздуха необходимо учитывать эти отклонения. Там, где движение ветра вследствие различия градиента атмосферного давления или рельефа местности меняется от места к месту или со временем, крайне важно производить анализы траекторий воздушных потоков при изучении влияния выбросов или установлении их возможного источника. Вычисление детальных траекторий требует множества точных измерений скоростей и направлений ветра. Вместе с тем вычисление даже приблизительных траекторий движения воздуха, для чего часто бывает достаточно проведения лишь немногих наблюдений над движением ветра, также может принести пользу. В то же время неустойчивость направления ветра способствует усилению рассеивания по горизонтали и снижению приземных концентраций примесей.

Большую роль в распространении примесей играют водные поверхности. Так, летом над водоемами образуются восходящие потоки, а в прибрежных районах – нисходящие.

В некоторых формах рельефа, например в котловинах, воздух застаивается, что приводит к накоплению загрязняющих веществ,

особенно при их выбросах из низких источников. В холмистой местности приземные концентрации загрязняющих веществ при прочих равных условиях обычно выше, чем в равнинной местности.

В городах на рассеивание загрязняющих веществ существенное влияние оказывает планировка улиц, их ширина, ориентация по сторонам света, а также высота зданий, наличие зеленых насаждений и водных объектов, представляющих собой различные формы наземных препятствий воздушному потоку. Все эти факторы приводят к возникновению особых метеоусловий. В целом в городах под влиянием застройки по сравнению с открытой местностью скорость ветра ослаблена на 50–85 % (Матвеев, 1984).

Ветер может по-разному влиять на процесс рассеивания примесей в зависимости от типа источника и характеристики выбросов. Газы, выбрасываемые источником и имеющие температуру, превышающую температуру окружающего воздуха, обладают начальной энергией подъема. Из-за разницы температур газозадушной смеси и окружающего воздуха около источника выброса формируется поле вертикальных скоростей, что способствует подъему и распространению примесей вверх. Подъем выбросов обуславливает уменьшение их концентраций у земной поверхности. Концентрация снижается также и при очень сильных ветрах, но уже за счет быстрого переноса примесей в горизонтальном направлении.

В случае низких источников или источников, выбросы которых имеют температуру, не превышающую температуру окружающего воздуха (холодные источники), повышенный уровень загрязнения воздуха будет наблюдаться при слабых ветрах (менее 1 м/с) в результате скопления примесей в приземном слое.

Максимальное содержание в атмосферном воздухе загрязняющих веществ обычно наблюдается на расстоянии, кратном 10–20 высотам труб источника выбросов. Указанную закономерность необходимо учитывать при проектировании размещения промышленных предприятий и жилых кварталов, обращая при этом внимание на повторяемость различных направлений ветра (розу ветров), особенно дующих со стороны существующих предприятий. Кроме того, необходимо принимать во внимание расстояние до предприятий, выбросы которых могут оказывать негативное воздействие.

В городах вытянутой формы влияние ветра особенно существенно. Если направление ветра совпадает с наибольшей протяженностью города, то наблюдается наложение выбросов различных источников.

При этом зона повышенного загрязнения создаётся в подветренной части города.

Контрольные вопросы

1. Какой продукт фотохимической реакции является наиболее вредным?
2. Что такое инверсии температуры, какими параметрами они характеризуются?
3. Как определяется коэффициент турбулентного обмена?
4. Чем приземные инверсии отличаются от приподнятых?
5. В чем проявляется связь между концентрацией примесей и относительной влажностью воздуха?
6. Как туман влияет на концентрацию примесей?
7. Что такое смоги? Как они классифицируются?
8. Как осадки влияют на концентрацию загрязняющих веществ?
9. Какая скорость ветра является наиболее опасной для загрязнения атмосферы?

2.7. Синоптическая ситуация

На загрязнение атмосферного воздуха, помимо отдельных метеорологических элементов, существенное влияние оказывает синоптическая ситуация в целом.

Под синоптической ситуацией (синоптическим положением) понимается совокупность взаимно связанных воздушных масс, фронтов, циклонов и антициклонов и других атмосферных объектов над некоторым участком земной поверхности, определяющая состояние погоды на этом участке (Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь. Том 3, 2008).

Как известно, синоптическая ситуация характеризуется сложным комплексом метеорологических параметров и отражает многообразие процессов, происходящих в атмосфере.

Согласно РД 52.04.306-92 «Атмосфера. Руководство по прогнозу загрязнения атмосферного воздуха» (1992) на основании целого ряда проведенных наблюдений к одной из неблагоприятных ситуаций для рассеивания загрязняющих веществ относят центральную область стационарного антициклона и ось малоподвижного гребня. Повышенный уровень загрязнения воздуха в городе наблюдается в случае, если эта ситуация в районе данного города отмечается не менее двух

дней подряд. Кроме того, высокий уровень загрязнения воздуха наблюдается в теплых антициклонах. Холодные антициклоны при этом менее опасны.

Отмечено, что рост концентрации примесей в городском воздухе имеет место преимущественно в теплых частях антициклона. В западной, северо-западной и центральной частях ЕТС – это западная и северо-западная периферии антициклона. При распространении на данные районы восточной периферии антициклона уровень загрязнения воздуха обычно понижен (РД 52.04.306-92, 1992).

Повышенные концентрации загрязняющих веществ могут наблюдаться также в малоградиентных барических полях, в первую очередь в районах с устойчиво сохраняющейся барической седловиной. Данные наблюдений свидетельствуют об увеличении загрязнения воздуха в теплых секторах циклонов при отсутствии в них сильного ветра и интенсивных осадков. Активная циклоническая деятельность способствует снижению концентраций загрязняющих веществ.

Исследования И. Н. Пономаренко (1975) свидетельствуют о том, что максимальные концентрации CO в приземном слое крупного города обычно наблюдались при наступлении антициклонов и усиливающихся гребнях антициклонов. Этому способствовали устойчивая стратификация в пограничном слое атмосферы и скорости ветра менее 3 м/с у подстилающей поверхности и менее 8 м/с в слое 0–1 км.

РД 52.04.306-92 (1992) установлены следующие характеристики синоптических процессов, способствующие формированию *относительно высокого уровня загрязнения воздуха* в городах:

- 1) малоградиентное барическое поле;
- 2) антициклоническая кривизна изобар;
- 3) теплая воздушная масса;
- 4) адвекция тепла в атмосфере.

В конкретных населенных пунктах могут быть выявлены дополнительные особенности влияния синоптических условий на загрязнение воздуха в зависимости от региональных особенностей синоптических процессов, микрометеорологического режима, параметров выбросов и расположения источников.

Для характеристики общего состояния загрязнения воздуха были предложены интегральные показатели (Методические указания, 1979; Сонькин, 1971, 1974; Синоптические условия..., 1979). Наибольший интерес представляет *интегральный показатель загрязнения воздуха P* , предложенный Л. Р. Сонькиным (1971) и включенный в РД 52.04.306-92.

Показатель P представляет собой отношение количества существенно повышенных концентраций (относительно среднего значения) к общему числу измерений в течение дня и находится по формуле

$$P = m/n, \quad (2.4)$$

где P – интегральный показатель загрязнения воздуха;

n – общее количество наблюдений за концентрацией примесей в городе в течение одного дня на всех стационарных постах;

m – количество наблюдений в течение этого же дня с концентрациями q , которые превышают среднесезонное значение q_{cp} более чем в 1,5 раза ($q > 1,5q_{cp}$).

Показатель P может определяться как для каждой отдельной примеси, так и для группы примесей. Его рекомендуется использовать для городов, где количество стационарных пунктов наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха не менее 3, а число наблюдений в отдельные дни составляет не менее 20. Этот показатель позволяет в какой-то мере избежать учета параметров выброса и учитывать только метеорологические условия.

Для получения ежедневных значений параметра P предварительно рассчитываются среднесезонные значения концентраций примесей для каждого стационарного поста отдельно для каждого года. По всему используемому ряду наблюдений отмечаются единичные концентрации, которые превышают $1,5q_{cp}$. Величины m и n и параметр P определяются для каждого дня. Значение показателя q_{cp} определяется как среднее из трех среднемесячных значений концентраций. Например, для летнего периода (июнь, июль, август) q_{cp} находится по формуле

$$q_{cp} = (q_{cp \text{ VI}} + q_{cp \text{ VII}} + q_{cp \text{ VIII}})/3. \quad (2.5)$$

Параметр P используется для составления прогностических схем. При оперативном прогнозировании загрязнения воздуха невозможно знать среднесезонное значение концентрации примесей до окончания сезона. Для ежедневного оперативного расчета параметра P рекомендуется учитывать средний уровень загрязнения воздуха в течение соответствующего трехмесячного периода предыдущего года и предшествующих двух месяцев данного года. Например, для расчета P в декабре 2019 г. находится q_{cp} как среднее значение среднемесячных концентраций пяти месяцев: ноября и декабря 2018 г., января 2019 г.,

октября и ноября 2019 г. Параметр P при этом может несколько отличаться от значений, рассчитанных по среднесезонным данным, за счет изменения уровня загрязнения воздуха от прошлого года к текущему, однако относительные изменения от одного дня к другому практически сохраняются.

При расчете параметра P по совокупности примесей не должны учитываться концентрации тех веществ, которые поступают в атмосферу только из небольшого числа высоких источников, поскольку для них НМУ могут отличаться от НМУ по городу в целом. Это в первую очередь относится к специфическим примесям. Если же источники поступления в атмосферу таких примесей рассредоточены по территории города, то данные об их концентрациях используются для расчета наряду с другими данными.

Значения параметра P могут изменяться от 0 (если ни одна из концентраций не превышает $1,5q_{cp}$) до 1,0 (если все измеренные концентрации превышают $1,5q_{cp}$).

Высокие значения параметра P отмечаются при неблагоприятном состоянии атмосферного воздуха в городе. В этих случаях под влиянием метеорологических условий могут наблюдаться высокие концентрации также тех веществ, которые не измеряются, но выбросы которых в данном городе осуществляются. Л. Р. Сонькиным (1971) установлено три градации загрязнения воздуха: пониженные (при P менее 0,20), относительно повышенные (при значениях P , равных 0,20–0,35) и высокие (при P более 0,35).

Параметр P для конкретного дня будет существенно зависеть от его значения за предыдущий день. В случае определения параметра P суммарно для ряда веществ целесообразно исключить из их перечня специфические примеси, характерные для отдельных источников.

По результатам 6-летних наблюдений в нескольких городах в различных регионах (Санкт-Петербург, Донецк, Архангельск, Екатеринбург, Чита, Владивосток) было выделено 118 периодов с относительно высоким уровнем загрязнения (параметр P превышает 0,3). Анализ протекавших в эти периоды синоптических процессов позволил выявить следующие типы неблагоприятных синоптических ситуаций: I – малоподвижный антициклон или гребень, II – малоградиентное барическое поле, III – некоторые периферии антициклона. Для большей части европейской территории страны (ЕТС) и на Урале – это западная и северо-западная периферия, в южной части ЕТС – южная, в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке – восточная периферия антициклона РД 52.04.306-92 (1992).

Аномально высокий уровень загрязнения воздуха (АВЗВ) по городу в целом встречается редко (1–2 % случаев). При этом параметр P обычно превышает 0,5. Синоптические ситуации, способствующие формированию АВЗВ: на европейской территории страны и на Урале – это ситуация с малоподвижным гребнем, направленным со стороны сибирского максимума; в северо-западной части ЕТС – ситуация с западной или северо-западной периферией антициклона в сочетании со слабой циклоничностью или фронтальными разделами западнее указанной периферии; в Западной Сибири (по данным наблюдений в Красноярске) – северо-западная часть антициклона, иногда при очень слабой циклоничности на фоне сибирского максимума; в Восточной Сибири (по данным наблюдений в Чите) – восточная периферия антициклона при разреженных изобарах.

Синоптические условия формирования АВЗВ в летний сезон примерно такие же, как и в зимний. Вместе с тем летом часть случаев АВЗВ имела место в центральных областях малоподвижных слабо развитых антициклонов. Анализ синоптических условий возникновения АВЗВ в городе свидетельствует, что он может формироваться только при устойчивых синоптических ситуациях. При неустойчивых процессах (быстром смещении барических образований и атмосферных фронтов, смене воздушных масс) высоких концентраций загрязняющих веществ обычно не наблюдается.

Контрольные вопросы

1. Что такое синоптическая ситуация? Какие виды синоптических ситуаций способствуют неблагоприятным условиям для рассеивания выбросов?
2. Какие синоптические ситуации способствуют формированию относительно высокого уровня загрязнения воздуха?
3. Какие виды синоптических ситуаций способствуют формированию аномально высокого уровня загрязнения атмосферного воздуха?

3. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РАССЕИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АТМОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

При решении ряда практических задач, связанных с охраной атмосферного воздуха, важное значение имеет информация о рассеивающей способности атмосферы в том или ином географическом районе и конкретном населенном пункте. Для этих целей служат методы оценки рассеивающей способности атмосферы на основе комплексных показателей.

Использование комплексных метеорологических показателей, характеризующих рассеивание и накопление загрязняющих веществ в атмосфере, началось в 1960-е годы. В это время американскими учеными был введен термин «*метеорологический потенциал загрязнения атмосферы*», который обозначал комплекс метеорологических условий, характеризующих процессы рассеивания и накопления загрязняющих веществ, их диффузию и оседание, вымывание осадками и химические превращения (Отчет о НИР..., 2014).

Данный показатель позволял уже на стадии проектирования и размещения промышленного предприятия с большим объемом выбросов загрязняющих веществ в атмосферу как можно эффективнее и рациональнее использовать особенности природных условий района строительства (прежде всего рельефа и климатических факторов).

В настоящее время существует несколько методов оценки рассеивающей способности атмосферы на основе комплексных метеорологических показателей.

1. Метод на основе потенциала загрязнения атмосферы

Это физико-статистический метод, разработанный в СССР в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова под руководством Э. Ю. Безуглой (1980), позволяющий отразить рассеивающую способность атмосферы посредством показателя возможного уровня загрязнения атмосферы, формирующегося под влиянием метеорологических условий при заданных параметрах выбросов в данном географическом районе. Данный показатель получил название *потенциала загрязнения атмосферы (ПЗА)*. ПЗА учитывает климатические особенности территории страны и до настоящего времени используется во всей официальной документации Росгидромета.

Показатель загрязнения атмосферы основывается на использовании климатической информации и показывает, во сколько раз средний уровень загрязнения воздуха в конкретном районе, обусловленный реальной повторяемостью метеорологических условий, будет выше, чем в условном районе с минимальными выбросами. Для вычисления *ПЗА* используется формула

$$ПЗА = \frac{q_i}{q_o}, \quad (3.1)$$

где q_i – средняя концентрация примесей в конкретном районе;

q_o – средняя концентрация примесей в условном районе.

Термин «потенциал загрязнения атмосферы» содержится в ряде нормативно-технических документов. Согласно РД 52.04.667-2005 (2006) под *потенциалом загрязнения атмосферы* понимается сочетание метеорологических условий, обуславливающих уровень возможного загрязнения атмосферы при данных источниках выбросов. Согласно ГОСТ 17.2.1.04-77 (1977) под *потенциалом загрязнения атмосферы* понимается сочетание метеорологических факторов, обуславливающих уровень возможного загрязнения атмосферы от источников в данном географическом районе.

Использование комплексного показателя такого типа позволяет выбирать оптимальные места для размещения проектируемых промышленных предприятий и заранее планировать перечень природоохранных мероприятий и вносить ограничения по мощности, высоте источников выбросов и иных их параметров.

ПЗА определяет перенос и рассеивание примесей, поступающих в воздушный бассейн с выбросами от предприятий и автотранспорта.

Поскольку состояние атмосферы непрерывно меняется во времени, возникла необходимость выделить климатический и метеорологический потенциал загрязнения атмосферы. *Климатический потенциал загрязнения атмосферы* отражает среднюю за многолетний период повторяемость метеорологических характеристик и является стабильной величиной. *Метеорологический потенциал загрязнения атмосферы* определяется конкретными метеоусловиями и рассчитывается на данный момент времени, поэтому он постоянно изменяется.

Повторяемость климатических показателей, характеризующих рассеивающую способность атмосферы, может быть использована для оценки изменчивости *ПЗА* в различных географических районах страны. Территория Российской Федерации характеризуется большим разнообразием климатических условий, которые определяют *ПЗА*.

На основании данных наблюдений за повторяемостью приземных инверсий и застоев воздуха, а также за повторяемостью слабых ветров и продолжительностью туманов, выполненных на 198 метеорологических станциях, располагавшихся на территории СССР, был произведен расчет показателя *ПЗА* для городских условий. Согласно полученным данным на территории страны *ПЗА* изменяется в достаточно широких пределах: от 2,1 до 4,0. Таким образом, при равных параметрах выбросов в городах средний уровень загрязнения может различаться почти в 2 раза за счет разной повторяемости неблагоприятных условий для рассеивания примесей. При этом минимальные значения *ПЗА* получены для северо-западной части ЕТС, включая побережья Белого и Баренцева морей – районов с минимальной повторяемостью слабых ветров и приземных инверсий температур.

Полученные данные о *ПЗА* и результаты изучения климатических характеристик, определяющих условия переноса рассеивания и вымывания примесей, позволили провести районирование территории страны для условий преобладания низких источников выбросов, характерных для городов. В результате было выделено 5 зон, границы которых показаны на рис. 3.1. В табл. 3.1 приведены градации изменения средних значений климатических параметров, определяющих *ПЗА* для каждой из зон.

Таблица 3.1

Средние годовые значения климатических параметров,
определяющих потенциал загрязнения атмосферы по зонам
(Климатические характеристики..., 1983)

Зона <i>ПЗА</i> и его характеристика	Значения <i>ПЗА</i>	Приземные инверсии			Повторяемость, %		Высота слоя перемешивания, км	Продолжительность туманов, ч
		Повторяемость, %	Мощность, %	Интенсивность, °С	скорости ветра 0-1 м/с	застоев воздуха		
Низкий	< 2,4	20–30	0,3–0,4	2–3	10–20	5–10	0,7–0,8	80–350
Умеренный	2,4–2,7	30–40	0,4–0,5	3–5	20–30	7–12	0,8–1,0	100–550
Повышенный: Континентальный район Приморский район	2,7–3,0	30–45	0,3–0,6	2–6	20–40	8–18	0,7–1,0	100–600
		30–45	0,3–0,7	2–6	10–30	10–25	0,4–1,1	100–800
Высокий	3,0–3,3	40–50	0,3–0,7	3–6	30–60	10–30	0,7–1,6	50–200
Очень высокий	> 3,3	40–60	0,3–0,9	3–10	50–70	20–45	0,8–1,6	10–600

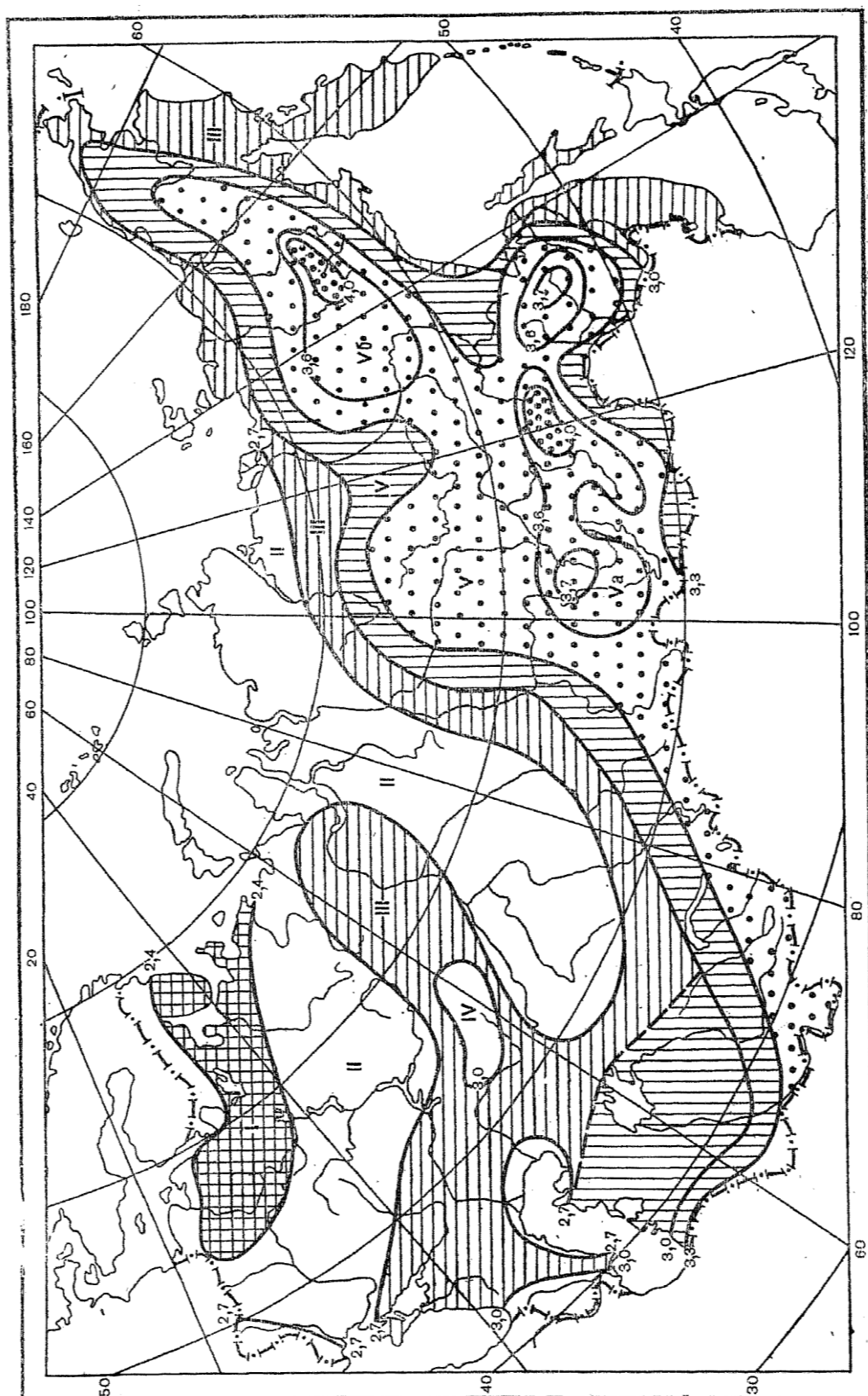


Рис. 3.1. Районирование территории СССР по потенциалу загрязнения атмосферы (Отчет о НИР..., 2014): зона I – низкий ПЗА, зона II – умеренный ПЗА, зона III – повышенный ПЗА, зона IV – высокий ПЗА, зона V – очень высокий ПЗА (Va – район Байкало-Амурской магистрали, Vб – Яно-Колымский район)

Как следует из рис. 3.1, наилучшие условия для рассеивания выбросов имеет зона I с низким ПЗА, охватывающая северо-западную часть ЕТС, в том числе побережья Белого и Баренцева морей. Здесь в среднем за год наблюдаются наиболее благоприятные условия для рассеивания вредных выбросов от низких источников. Повторяемость ветров со скоростью менее 1 м/с не превышает 20 %. Повторяемость приземных инверсий в целом за год составляет 20–30 %, а в утренние и вечерние часы она достигает 40–65 %. Максимум повторяемости приземных инверсий отмечается весной и осенью. Формирование инверсий в указанной зоне сопровождается ослаблением скорости ветра. При скорости ветра 1 м/с и менее приземные инверсии наблюдаются только в 5–10 % случаев. Мощность приземных инверсий и их интенсивность в течение года обычно невелики (примерно 0,4 км и 2–3 °С соответственно). Однако в январе они увеличиваются (до 0,8 км и 3–8 °С соответственно). В этих условиях редко наблюдается скопление примесей у земной поверхности. Кроме того, очищению атмосферы способствуют особенности годового хода продолжительности осадков, которые вымывают загрязняющие вещества из атмосферы. Максимум осадков здесь наблюдается в сентябре-октябре при высокой повторяемости инверсий утром и вечером, что приводит к понижению неблагоприятного воздействия инверсий. Туманы образуются редко (40–60 дней в году). Повышенный уровень загрязнения формируется в переходный сезон (весной и осенью). Повышенные значения ПЗА отмечаются ночью в теплое полугодие.

Зона II характеризуется умеренным ПЗА, охватывает центральную, юго-западную и северо-восточную части европейской территории страны, а также часть Западной Сибири. В данной зоне повторяемость скорости ветра 0–1 м/с даже в защищенных условиях не превышает 40 %. Периоды длительного сохранения скорости ветра 1 м/с и менее наблюдаются от 1 до 5 раз в месяц. Повторяемость приземных инверсий за год составляет 30–40 %. Их максимум так же, как и максимум скорости ветра 0–1 м/с, наблюдается летом. Примерно в 30 % случаев инверсии наблюдаются при скорости ветра 0–1 м/с. Большое влияние на ПЗА оказывают приподнятые инверсии. Число дней с туманами не превышает 40 за год. В основном туманы образуются в холодное полугодие. На севере Западной Сибири число дней с туманами составляет 20–30 в год. Минимум осадков наблюдается в июле, максимум – в октябре. В зависимости от метеорологических условий в разные периоды года формируются примерно одинаковые условия как для рассеивания, так и для накопления примесей в приземном слое

воздуха. Повышенный уровень загрязнения атмосферы может отмечаться преимущественно летом. При этом максимум *ПЗА* летом часто усиливается в результате уменьшения количества осадков по сравнению с таковым зимой. Зимой наблюдается увеличение мощности и интенсивности инверсий, а также повторяемости туманов, что в отдельные годы способствует развитию зимнего максимума загрязнения воздуха.

Зона III характеризуется повышенным *ПЗА*, охватывает юг Украины, Нижнее Поволжье, Северный Кавказ, большую часть Урала, часть Западной Сибири и Казахстана, побережье северо-восточных и дальневосточных морей, Камчатку и Сахалин. Параметры, определяющие *ПЗА* в этих районах, несколько различаются. Зона отличается большой пространственной изменчивостью летних атмосферных осадков. Их продолжительность убывает с севера на юг от 800 ч в районе Салехарда до 10 ч на Украине, Нижнем Поволжье и Казахстане. Число дней с туманами в Западной Сибири, на Урале и в Казахстане составляет 15–25, на Украине – несколько больше. Преобладает один максимум годового загрязнения воздуха летом либо два максимума (летом и зимой).

Зона IV характеризуется высоким *ПЗА*, охватывает Южный Урал, часть Красноярского края, Среднюю Азию, южные районы Казахстана и Кавказ. Низкая рассеивающая способность атмосферы обусловлена преобладанием слабых ветров и мощных приземных инверсий. Повторяемость слабых ветров составляет 30–60 %, а приземных инверсий – 40–50 %. Максимумы осадков наблюдаются весной и осенью. Летом осадков мало, и они не играют существенной роли в очищении атмосферы от примесей.

Зона V характеризуется очень высоким *ПЗА*, охватывает южные и горные районы Средней Азии и Восточную Сибирь. Метеорологические условия несколько отличаются в разных районах. В Восточной Сибири зимой формируется мощный антициклон со слабыми ветрами и устойчивой стратификацией атмосферы. Повторяемость скорости ветра 0–1 м/с составляет 50–70 %. Максимум *ПЗА* наблюдается зимой. Особо выделяют район Va – Байкало-Амурскую магистраль и Vб – Яно-Колымский район, которые находятся в особых климатических условиях и характеризуются наибольшей повторяемостью приземных инверсий, а в холодное время года постоянно находятся под воздействием сибирского антициклона. Повторяемость слабых ветров здесь также значительно выше, чем в других районах страны.

Вышеописанное пространственное распределение *ПЗА* представляет собой макроклиматическую характеристику рассеивающей способности атмосферы в различных физико-географических районах территории страны вне влияния городов. В городах, в свою очередь, наблюдается изменение термического режима, которое приводит к образованию острого тепла и изменению особенностей циркуляции воздуха.

ПЗА испытывает значительную изменчивость во времени, которая достоверно выявляется при наблюдениях за период не менее 5 лет (Климатические условия..., 1983).

2. Метод на основе расчета метеорологического потенциала атмосферы (МПА)

Метод был предложен Т. С. Селегей (Рекомендации..., 1987; Селегей, Юрченко, 1990). *МПА* учитывает факторы, способствующие как загрязнению, так и рассеиванию в атмосфере загрязняющих веществ. Метод разработан в середине 1980-х годов в период бурного промышленного освоения Сибири, когда возникла необходимость в новых подходах к оценке состояния окружающей среды и прогнозированию ее изменения под воздействием техногенных факторов.

Метод основан на определении относительного показателя, учитывающего факторы, способствующие накоплению загрязняющих веществ в атмосфере (повторяемость скоростей ветра 0–1 м/с и число дней с туманами), а также факторы, способствующие рассеиванию загрязняющих веществ (число дней с осадками более 0,5 мм и повторяемость скоростей ветра 6 м/с и более).

МПА атмосферы рассчитывается по формуле

$$МПА = (P_{сл} + P_m)/(P_o + P_в), \quad (3.2)$$

где $P_{сл}$ – повторяемость скоростей ветра 0–1 м/с;

P_m – число дней с туманом;

P_o – число дней с осадками более 0,5 мм;

$P_в$ – повторяемость скоростей ветра ≥ 6 м/с.

При этом чем больше значение *МПА*, тем более благоприятные условия формируются для рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере. Если *МПА* меньше 1,0, это означает, что в данный период времени повторяемость процессов, способствующих очищению атмосферы, преобладает над повторяемостью процессов, способствующих

накоплению в ней вредных веществ. В таком случае создаются благоприятные условия для рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере. Если *МПА* больше 1,0, создаются неблагоприятные условия для рассеивания примесей.

По данным среднесуточных наблюдений, проведенных на 807 метеостанциях СССР, был рассчитан показатель *МПА*, диапазон варьирования среднесуточных значений которого составил 0,1–5,0. При этом минимальное значение *МПА* было отмечено на леднике Федченко (0,1), максимальное – в Фергане (5,0). По величине *МПА* было выполнено районирование территории СССР и выделено три зоны исходя из способности атмосферы к самоочищению (рис. 3.2). Хорошими условиями для рассеивания примесей в атмосфере считаются значения *МПА* менее 1,0; неблагоприятными – при *МПА* более 1,0; крайне неблагоприятными – при *МПА* более 3,0.

Предложенное Т. С. Селегей (Рекомендации..., 1987) районирование по *МПА* по сравнению с районированием по *ПЗА*, предложенным Э. Ю. Безуглой (Климатические условия..., 1983), отличаются только в отдельных деталях. Граница, отделяющая районы с *МПА* более 1,0 (неблагоприятные условия для рассеивания примесей), в целом совпадает с внешней границей IV зоны районирования по *ПЗА*, которая отделяла высокий потенциал загрязнения атмосферы от повышенного. Значения *МПА* более 2,0 соответствуют очень высокому *ПЗА*. Значения *МПА* менее 1,0 (благоприятные условия для рассеивания примесей) соответствовали низкому, умеренному и повышенному *ПЗА* (I, II, III зоны).

3. Метод на основе климатического потенциала самоочищения атмосферы

Метод был предложен Л. П. Сорокиной (1995) для региональной оценки условий формирования качества атмосферного воздуха. При этом использовались подходы, аналогичные *МПА*, но с другими граничными условиями и набором метеоэлементов. В качестве факторов, способствующих накоплению примесей в атмосфере, принимались средние многолетние значения числа дней с туманами, относительной влажностью более 80 % и штилем. Самоочищение атмосферы рассчитывалось по числу дней с сильным ветром (более 15 м/с) и осадками более 5 мм. Значения факторов нормировались на амплитуду относительно всего ряда наблюдений их значений в регионе. По соотношению сумм нормировочных значений определялся *климатический потенциал самоочищения атмосферы (КПСА)*.

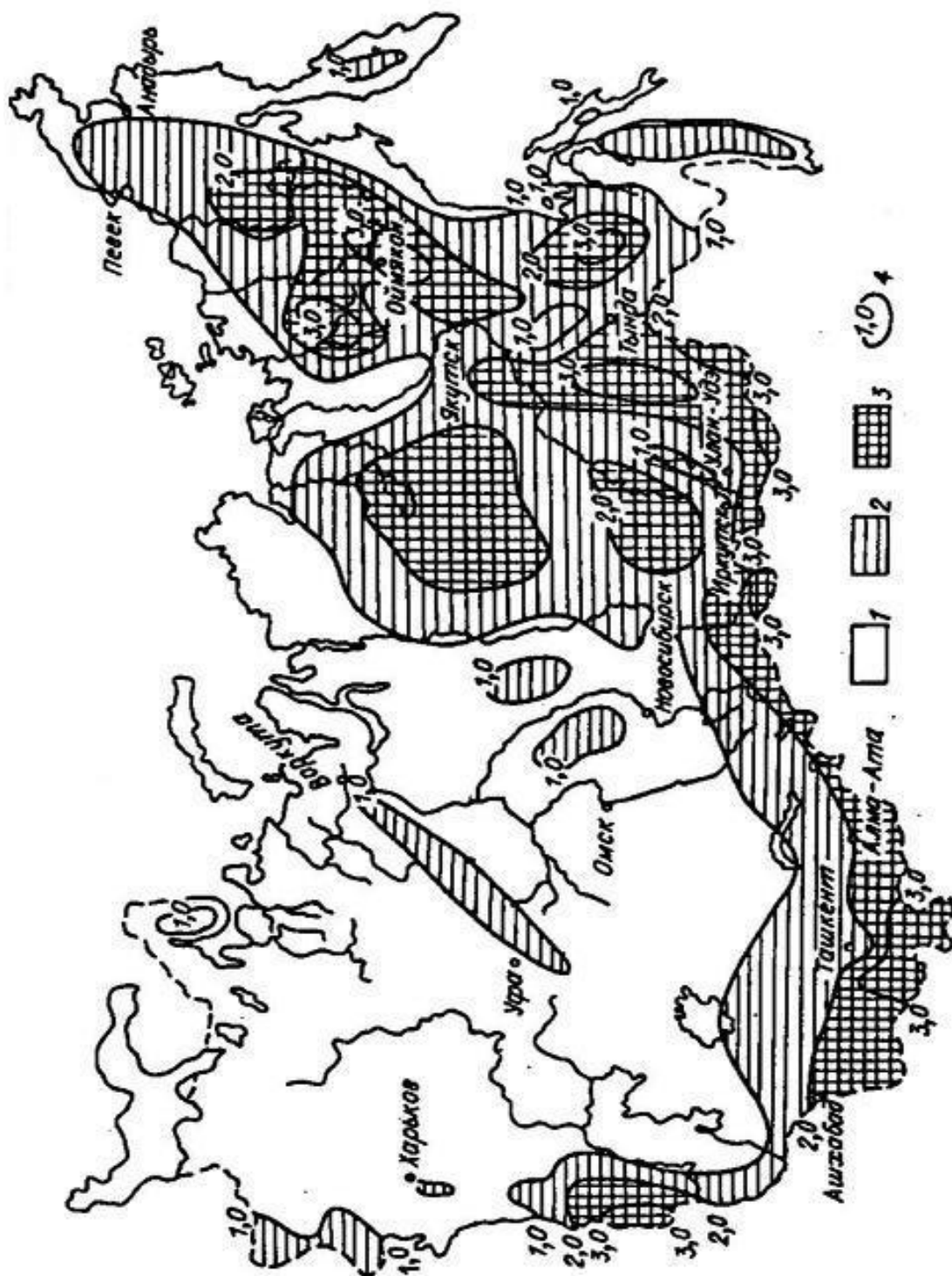


Рис. 3.2. Районирование территории СССР по метеорологическому потенциалу рассеивающей способности атмосферы (МПА) (Отчет по НИР ..., 2014).

Условия для рассеивания примесей:

1 – хорошие; 2 – неблагоприятные; 3 – крайне неблагоприятные; 4 – показатель МПА

КПСА зависел от определенного соотношения климатических параметров, влияющих на загрязнение атмосферного воздуха. Значения *КПСА* на территории Сибири и Дальнего Востока изменялись от 0 до 4,5. При этом значения более 2,0 встречались крайне редко и были отнесены к максимальному потенциалу. Значения *КПСА* менее 0,1 соответствовали минимальным возможностям климата для самоочищения атмосферы. Шкала *КПСА* была разделена автором на градации через 0,5 единиц, которые имели следующие оценки: незначительный, слабый, умеренный, значительный *КПСА*.

Преимущество метода, предложенного Л. П. Сорокиной, по сравнению с методом определения *МПА* Т. С. Селегей заключается в применении нормирования, позволяющего выявить и оценить влияние каждого из факторов на загрязнение атмосферы из общего контекста. Недостаток метода – в технической сложности расчетов, которая, однако, компенсируется конкретностью и сравнимостью результатов.

Методика региональной оценки *КПСА* была апробирована Л. П. Сорокиной для территорий Тывы и Иркутской области, а также для иных территорий Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Вместе с тем Л. П. Сорокина (1995) попыталась количественно оценить влияние рельефа местности на качественный состав приземного слоя воздуха на примере Иркутско-Черемховской долины. Параметры рельефа при этом оценивались абсолютной высотой над уровнем моря рассматриваемой территории и пространственной ориентацией форм рельефа по отношению к преобладающему направлению переноса воздушных масс. Метеорологическая информация, использованная для анализа, включала годовую амплитуду температуры воздуха T , среднюю скорость ветра U , повторяемость штилей $Ш$, годовую сумму атмосферных осадков O , число дней с относительной влажностью более 80 % F и качественную характеристику условий образования приземных инверсий температуры. По соотношению всех указанных параметров вычислялся *мезоклиматический потенциал (МП) формирования качества атмосферного воздуха*.

В зависимости от условий местности Л. П. Сорокиной (1995) была разработана шкала оценочных баллов (табл. 3.2). Самый низкий балл (1,0) соответствует более благоприятным метеорологическим условиям для самоочищения атмосферного воздуха, а самый высокий (5,0) – менее благоприятным. Градации метеорологических показателей определялись диапазоном их изменения на исследуемой территории. В табл. 3.3 приведены пределы изменения мезоклиматического потенциала для различных территорий Иркутской области, рассчитанные

авторами Отчета о НИР... (2014), на основе анализа их ландшафтных характеристик.

Таблица 3.2

Шкала оценочных баллов для определения мезоклиматического потенциала атмосферы территорий со сложной орографией местности (по данным Л. П. Сорокиной, 1995)

Баллы	T, °C	U, м/с	Ш, %	O, мм	F > 80 %	Условия образования инверсий
1	< 33,0	> 3,0	1–14	> 650	> 40	Крайне неблагоприятные
2	34,0–36,9	2,5–2,9	15–24	550–649	40–49	Неблагоприятные
3	37,0–39,9	2,0–2,4	25–39	450–549	50–59	Хорошие
4	40,0–41,9	1,5–1,9	40–49	350–449	60–69	Благоприятные
5	> 42,0	< 1,5	> 50	< 350	> 70	Весьма благоприятные

Таблица 3.3

Мезоклиматические характеристики физико-географических выделов

Выдел*	Ориентация,**	Метеорологические элементы						Сумма баллов
		T	U	Ш	O	F	Условия образования инверсий	
I	A	3-4	3	2-3	4	4	3	20-21
	B	5	4	4	4-5	3	4	24-25
II	-	3	2	2	3	5	3	18
III	A	3	4	4	1	3	4	19
	B	3-4	5	5	1	3-4	5	22-23
IV	-	2-3	3-4	2	2	3-4	2	14-16
V	-	1-2	1-2	1	1	4-5	1	10-13
VI	-	1	3	2	2	5	5	18

* Выровненные площадки (уклон 0–2°), широкие долины (более 10 км в поперечнике); II – холмистый рельеф с крутизной склонов 2–8°; III – горные долины шириной до 4 км; IV – низкогорный рельеф с крутизной склонов 8–20°, высотой до 700 м над уровнем моря; V – средне- и высокогорный рельеф с крутизной склонов 14–20°, высотой над уровнем моря более 1000 м; VI – южное побережье озера Байкал.

** A – долины, ориентированные в направлении основного переноса воздушных масс; B – долины, ориентированные перпендикулярно основному переносу воздушных масс.

Как следует из табл. 3.3, в зависимости от физико-географических условий Иркутско-Черемховской долины *МП* изменяется от 10 до 25 баллов. С учетом гипсометрической основы и карты крутизны склонов исследуемая территория была дифференцирована по четырем градациям мезоклиматического потенциала:

10–13 баллов – оптимальный *МП*;

14–17 – средний *МП*;

18–21 – низкий *МП*;

22–25 – крайне низкий *МП*.

Как показали полученные результаты, наиболее благоприятными условиями для обеспечения чистоты воздуха обладает средне- и высокогорный рельеф, самыми неблагоприятными – долины рек, ориентированные перпендикулярно основному переносу воздушных масс (Отчет о НИР..., 2014).

4. Метод метеорологического параметра загрязнения (*МПЗ*)

Метод предложен в 2012 г. И. Н. Кузнецовой (2012) и основан на оценке метеопараметров в пограничном слое атмосферы. Метод пока имеет сугубо локальное применение для прогнозирования уровня загрязнения атмосферного воздуха г. Москвы. По сути, это метод прогнозирования неблагоприятных метеорологических условий.

В табл. 3.4 приведены количественные характеристики и синоптическое *МПЗ*. Как следует из табл. 3.4, *МПЗ*, характеризующийся баллом 0,5, присваивается в случае поступления загрязненного воздуха из удаленных районов, где наблюдаются природные лесные пожары, крупные аварии на производственных объектах и иные чрезвычайные ситуации, связанные с загрязнением воздуха, и устанавливается на основе анализа спутниковой информации методом траекторного анализа переноса загрязняющих веществ из зафиксированных очагов горения, а также иной информации.

МПЗ I типа, характеризующийся баллами от 1,0 до 2,0, соответствует плохим условиям для очищения атмосферного воздуха – по сути, неблагоприятным метеорологическим условиям (НМУ).

МПЗ II типа (умеренное рассеивание) с баллами 3,0–7,0 соответствует атмосферным условиям, при которых на большей части территории города содержание загрязняющих веществ в приземном слое повышено относительно фона, но не достигает критических уровней.

МПЗ III типа (интенсивное рассеивание) с баллами 8,0–11,0 соответствует благоприятным для очищения воздуха условиям за счет интенсивного вертикального и горизонтального обмена, смены воздушных масс и вымывания осадками загрязняющих веществ.

Таблица 3.4

Количественные характеристики и синоптическое описание
метеорологического параметра загрязнения (МПЗ)

Интенсивность рассеивания примесей (очищения атмосферы)	Скорость ветра в приземном слое на определенной изобарической поверхности	Синоптическая ситуация (основные признаки)	Термическая устойчивость, осадки и иные признаки	Балл МПЗ
Поступление загрязненного воздуха из удаленных районов природных пожаров, крупных аварий и иных чрезвычайных ситуаций, устанавливаемое по спутниковым изображениям с помощью траекторного анализа переноса из зафиксированных очагов горения и иной информации				0,5
I Слабая (неблагоприятные метеорологические условия)	Слабая в слое 1–1,5 км (2–5 м/с на изобарической поверхности 0–850 гПа)	Малоградиентное барическое поле, устойчивая стратификация	Инверсия температуры с нижней границей ≤ 150 м	1,0
			Близкая к изотермии стратификация температуры. Без осадков	2,0
II Умеренная	Умеренная в слое 0,5–1,5 км 6–7 м/с (на изобарической поверхности 850–925 гПа)	Малоградиентная периферия барического образования с выраженным направлением переноса. Возможны слабые непродолжительные осадки	Средний слой перемешивания не выше 300 м или близкая к изотермии стратификация в слое до 300 м	3,0
			Периферия антициклона	4,0
			Теплый сектор циклона, без осадков	5,0
			Периферия антициклона и слабые осадки (0,1–3,0 мм за 12 ч)	6,0

Интенсивность рассеивания примесей (очищения атмосферы)	Скорость ветра в приземном слое на определенной изобарической поверхности	Синоптическая ситуация (основные признаки)	Термическая устойчивость, осадки и иные признаки	Балл МПЗ
II Умеренная	Умеренная в слое 0,5–1,5 км 6–7 м/с (на изобарической поверхности 850–925 гПа)	Малогradientная периферия барического образования с выраженным направлением переноса. Возможны слабые непродолжительные осадки	Теплый сектор циклона, моросящие осадки	7,0
III Интенсивная	Сильная в слое 0,5–1,5 км 8 и более м/с (на изобарической поверхности 850–925 гПа)	Градиентная периферия барического образования с выраженным направлением переноса, сменой воздушных масс или сильные осадки	Центр циклона со слабыми ветрами, средний слой перемешивания выше 300 м	8,0
			Резкая смена воздушной массы (на изобарической поверхности 925 гПа изменение температуры за 12 ч в холодный период года 3 °С и более, в теплый период года 4 °С и более)	9,0
			Зона атмосферного фронта. Умеренные или сильные осадки (более 3 мм за 12 ч)	10,0
			Средняя скорость в пограничном слое атмосферы более 10 м/с	11,0

5. Метод на основе усовершенствованного показателя рассеивающей способности атмосферы (УМПА)

Метод разработан Сибирским региональным научно-исследовательским гидрометеорологическим институтом (ФГБУ «СибНИГМИ») на основе анализа и обобщения существующих методов оценки рассеивающей способности атмосферы (Отчет о НИР..., 2014). Показатель УМПА рассчитывается по формуле

$$УМПА = K_t + K_v + K_{осад}, \quad (3.3)$$

где K_t – коэффициент теплообеспеченности;

K_v – коэффициент ветра;

$K_{осад}$ – коэффициент осадков.

Для оценки теплообеспеченности территории используется частное от деления сумм среднемесячных температур воздуха теплого периода к среднемесячным температурам холодного периода:

$$K_t = \frac{\sum t_{\text{ср.м.теплого периода}}}{\sum t_{\text{ср.м.холодного периода}}}. \quad (3.4)$$

Для расчета используется только абсолютное значение этого соотношения независимо от его знака.

При отсутствии информации о среднемесячных температурах воздуха и невозможности расчета K_t их значения могут быть восстановлены через среднегодовую температуру воздуха по формуле

$$K_t = 0,9998e^{0,176t_{\text{ср. год}}}. \quad (3.5)$$

Коэффициент теплообеспеченности K_t часто применяется при оценке климатических особенностей территорий с точки зрения их экологической напряженности (Ладейщиков, 1985).

При K_t менее 1,0 продолжительность холодного периода преобладает над теплым, а при K_t более 1,0 теплый период года преобладает над холодным. Чем меньше значения K_t , тем хуже условия рассеивания примесей. При K_t менее 0,3 условия рассеивания примесей крайне неблагоприятные, при K_t от 0,3 до 1,0 – неблагоприятные, при K_t более 1,0 – благоприятные. Зависимость условий рассеивания примесей от величины K_t объясняется, с одной стороны, тем, что чем продолжительнее холодный период, тем больше необходимо сжечь топлива в отопительный период. При этом чем больше сожжено топлива, тем

больше поступает в атмосферу продуктов его сжигания. С другой стороны, интенсивность разложения поступающих в атмосферу веществ зависит от количества ультрафиолетовой радиации и температуры воздуха. Зимой в умеренных широтах из-за недостатка ультрафиолетовой радиации и низких температур воздуха самоочищение происходит медленнее, в то время как в южных широтах ($K_t > 1,0$) этот процесс происходит в десятки раз быстрее.

Коэффициент ветра K_v находится по формуле (3.6) через отношение годовой повторяемости числа случаев скоростей ветра 6 м/с и более ($P_{\geq 6}$), способствующих выносу загрязняющих веществ из города и их рассеиванию, к повторяемости числа случаев скоростей ветра 0–1 м/с (P_{0-1}), которые приводят к застойным ситуациям и увеличению загрязнения атмосферы:

$$K_v = P_{\geq 6} / P_{0-1}. \quad (3.6)$$

Характерно, что чем больше величина коэффициента ветра K_v , тем лучше условия для рассеивания примесей и наоборот. При значении $K_v \geq 1,0$ ветровой режим способствует рассеиванию примесей в атмосфере; при K_v меньше 1,0 преобладают условия затишья, способствующие накоплению примесей в атмосфере, при $K_v < 0,5$ создаются крайне неблагоприятные условия для рассеивания примесей.

Коэффициент осадков рассчитывается по формуле

$$K_{осад} = \sum O_{год} / 400, \quad (3.7)$$

где $\sum O_{год}$ – годовая сумма осадков, мм;

400 – годовая норма количества осадков, необходимая для очищения атмосферного воздуха, мм.

Чем больше по абсолютной величине $K_{осад}$, тем лучше условия увлажнения (самоочищения) атмосферного воздуха. При $K_{осад} \geq 1,0$ – хорошие условия для самоочищения, при $0,5 \leq K_{осад} < 1,0$ – плохие (недостаточные), при $K_{осад} < 0,5$ – крайне недостаточные.

Таким образом, УМПА рассчитывается по формуле

$$УМПА = K_t + K_v + K_{осад} = e^{0,176t_{cp}} + P_{\geq 6} / P_{0-1} + O_{год}/400, \quad (3.8)$$

где t_{cp} – среднегодовая температура воздуха, °С;

$P_{\geq 6}$ – повторяемость скорости ветра ≥ 6 м/с, %;

P_{0-1} – повторяемость скорости ветра 0–1 м/с, %;

$O_{год}$ – годовая сумма осадков, мм;

400 – годовая норма количества осадков, необходимая для очищения атмосферного воздуха, мм.

Чем больше по своему значению $УМПА$, тем лучше на данной территории условия для рассеивания загрязняющих веществ.

При $УМПА \geq 3,0$ создаются хорошие условия для рассеивания поллютантов, поскольку все три составляющие, входящие в формулу (3.8), имеют хорошие условия для их рассеивания либо один доминант, способствующий рассеиванию поллютантов, настолько силен, что компенсирует недостатки одного или двух других компонентов, недостаточных для рассеивания; при $3,0 < УМПА \leq 2,0$ создаются неблагоприятные условия для рассеивания поллютантов и при $УМПА < 2,0$ – крайне неблагоприятные.

Обобщая вышеизложенное, можно выделить несколько направлений исследований в области количественной оценки загрязнения атмосферного воздуха в зависимости от метеорологических факторов.

1. Исследования Э. Ю. Безуглой и предложенный ею потенциал загрязнения атмосферы (ПЗА) на основе физико-статистического метода оценки влияния климатических условий на содержание загрязняющих веществ в атмосфере.

2. Исследования Т. С. Селегей, Л. П. Сорокиной и др. (основанные на определении показателей: *метеорологического потенциала атмосферы (МПА)* и *климатического потенциала самоочищения атмосферы (КПСА)* путем анализа относительно простой и доступной метеорологической (климатической) информации, имеющейся на всей сети метеорологических наблюдений Росгидромета.

3. Исследования И. Н. Кузнецовой, основанные на данных по синоптической ситуации определенного региона для составления прогноза наступления неблагоприятных метеорологических условий.

4. Исследования целого ряда авторов по определению потенциала загрязнения с помощью математических моделей.

5. Исследования ФГБУ «СибНИГМИ», обобщающие результаты других исследований.

В настоящее время в подразделениях Федеральной службы Росгидромета при составлении прогнозов загрязнения атмосферы используется *потенциал загрязнения атмосферы (ПЗА)*. Полученные данные публикуются в ежегодных докладах о состоянии атмосферного воздуха органов исполнительной власти субъектов Российской

Федерации. При этом, как показывают результаты наблюдений, средний за год показатель ПЗА даже в пределах одной подведомственной территориальному управлению гидрометеорологической службы территории может существенно различаться, например в Челябинске и Екатеринбурге. Данный метод позволяет выявить эти различия.

Метод И. Н. Кузнецовой не позволяет достаточно точно учитывать синоптическую ситуацию при прогнозе загрязнения атмосферы. Достоинство ее метода заключается в возможности автоматизировать работу и распространить на всю страну, а не только использовать в ограниченном регионе. Для оценки эффективности этого метода необходимы дополнительные исследования и апробация.

Большой интерес представляют методы Т. С. Селегей, Л. П. Сорокиной и др., основанные на использовании простой и доступной метеорологической информации. Данные методы показывают устойчивую корреляцию с отдельными загрязняющими веществами и в целом могут быть адаптированы для любой территории нашей страны. В то же время они имеют существенный недостаток, поскольку не учитывают инверсии температуры, что особенно важно для Сибири с большой повторяемостью задерживающих слоев.

В перспективе следует ожидать, что математические модели для определения потенциала загрязнения атмосферного воздуха, по всей вероятности, займут лидирующее место в практическом использовании. Однако в настоящее время система Росгидромета не готова предоставить оперативные данные для наполнения таких моделей.

Контрольные вопросы

1. Какие вы знаете методы оценки рассеивающей способности атмосферы на основе комплексных метеорологических показателей?
2. В чем заключается метод на основе показателя загрязнения атмосферы (ПЗА)?
3. В чем заключается метод на основе климатического потенциала самоочищения атмосферы (КПСА)?
4. В чем заключается метод на основе метеорологического параметра загрязнения (МПЗ)?
5. В чем заключается метод на основе усовершенствованного показателя рассеивающей способности атмосферы (УМПА)?

4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Прогнозирование загрязнения воздуха позволяет своевременно принять меры по сокращению вредных выбросов в периоды неблагоприятных метеорологических условий.

Теоретические основы прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха подробно описаны М. Е. Берляндом (1985), согласно которому методы прогноза делятся на численные и статистические.

Численные методы прогноза реализуются с помощью уравнений, описывающих распространение примесей в атмосфере с учетом изменения их концентраций во времени (Гаргер, 1984; Транспортная модель..., 2000; Воздействие..., 2005; Аргучинцев, 2007; Алоян, 2008; Степаненко, 2008;). Они дают более точные результаты за счет учета режимов выбросов от источников, изменения выбросов во времени и сведений об ожидаемых метеорологических условиях (Рязанов, 2019).

Численные методы позволяют рассчитать максимальные концентрации примесей, создающиеся на определенном расстоянии от источника выбросов при нормальных условиях. При этом для расчета сначала определяется эффективная высота источника по формуле

$$H_e = H + \Delta H, \quad (4.1)$$

где H_e – эффективная высота источника, м;

H – высота источника, м;

ΔH – начальный подъем факела (эффективное изменение высоты источника выбросов под влиянием начальной скорости и (или) перегрева выбрасываемой из источника газовой или пылегазовоздушной смеси за счет скоростного напора и (или) сил плавучести, м.

Определение эффективной высоты источника вызвано тем, что выбросы из дымовых и вентиляционных труб и отверстий обладают начальной скоростью и имеют более высокую температуру относительно окружающего воздуха. Часто наблюдается существенный подъем дымового факела непосредственно над трубой, что особенно заметно при слабом ветре, когда дым над трубой поднимается вертикально вверх на некоторое расстояние (Берлянд, 1985).

В настоящее время известно большое количество различных формул для определения параметра ΔH , например формулы Берлянда, Зельдовича и Шмидта, Холланда, Лукаса, Бриггса и др.

Для расчета максимальных концентраций на определенном расстоянии от источника выброса при нормальных атмосферных условиях выведен ряд формул для линейных, площадных и рассредоточенных по площади источников (Берлянд, 1985).

Ряд исследований свидетельствует, что влияние города на характер рассеивания примесей по сравнению с открытой местностью в целом несущественно. Однако от низких источников горизонтальное рассеивание загрязняющих веществ в городе будет больше, чем на открытой местности. Разница в рассеивании увеличивается в ночное время на 30–50 % (Graham, 1968). В целом для расчета концентраций загрязняющих веществ в условиях города в первом приближении можно использовать те же формулы, что и для открытой ровной местности.

Вследствие большой неоднородности поля концентраций загрязняющих веществ и недостаточности экспериментальных данных для его оценки на практике часто пользуются теоретическими моделями распределения примесей от многих источников. Для этих целей часто применяют упрощенные подходы. Например, город разбивается сеткой на квадраты, для каждого из которых оценивается примерный суммарный выброс вредных веществ. Затем рассчитывается суммарная концентрация выбросов у земной поверхности для всего города. При этом условно принимают, что высота источников и их начальный подъем примерно одинаковы для всего города.

В общем случае статистические методы прогноза позволяют определить фоновое загрязнение воздуха в городе в среднем за сутки. Численные методы дают возможность уточнить прогноз на более короткие сроки в пределах суток для отдельных районов города. При наличии в городе автоматической системы контроля загрязнения атмосферного воздуха возможно уточнение численного прогноза за счет фильтрации некоторых исходных данных.

Статистические методы прогноза применяются для оценки загрязнения от множества источников выбросов с использованием статистической обработки результатов наблюдений. При этом для упрощения задачи допускается, что за весь период наблюдений и срок прогнозирования параметры выбросов и расположение источников являются постоянными. Однако такое допущение возможно только для коротких сроков прогноза – от нескольких часов до нескольких суток. Кроме того, в случае большого числа источников и при отсутствии сведений об их мощности предполагают, что увеличение выбросов от одной их части компенсируется их уменьшением у другой

их части. Таким образом, увеличение среднего и суммарного загрязнения воздуха в городе связывают исключительно с изменением метеорологической обстановки (Берлянд, 1985).

Разработка статистических методов прогноза начинается с выявления периодов значительного загрязнения атмосферы. Затем устанавливаются корреляционные связи между наблюдавшимся в анализируемый период уровнем загрязнения воздуха и метеорологическими величинами либо их определенными сочетаниями. Полученные результаты позволяют выработать определенные прогностические правила. Кроме того, в процессе прогнозирования пользуются методами статистической экстраполяции временной динамики загрязнения воздуха с учетом установленных корреляционных связей и инерционных факторов.

Для статистических методов прогноза загрязнения воздуха характерны некоторые погрешности и ограничения результатов анализа (Монин, 1965; Хргиан, 1986), которые вызваны влиянием большого числа факторов и ограничением интервала наблюдений.

В целях получения актуальных данных для составления прогнозов загрязнения целесообразно проведение непрерывной регистрации примесей в атмосфере методом спектрального анализа с помощью автоматических газоанализаторов.

Для анализа корреляционных связей между загрязнением приземного слоя и метеофакторами для составления краткосрочных прогнозов часто применяются методы линейной регрессии, в частности множественный регрессионный анализ. Частным случаем такого анализа является метод авторегрессии, при котором оцениваются корреляционные связи между значениями исследуемой величины в разные временные периоды. Таким образом, осуществляется экстраполяция рядов данных, полученных в результате наблюдений за предшествующие периоды времени.

Поскольку кривая распределения концентраций примесей в атмосфере лучше всего аппроксимируется с функцией логарифмически нормального распределения, ряд авторов (Bringfelt, 1971; Kaspczycki, 1978; Chandler, Elson, 1978 и др.) предложил использовать для прогнозирования уравнения линейно-логарифмической регрессии.

Вместе с тем выявленные с помощью уравнений линейной регрессии связи между загрязнением воздуха и метеорологическими параметрами не всегда являются тесными, поскольку одни и те же условия погоды оказывают различное влияние в зависимости от технологических параметров и пространственного размещения источников

выбросов. Кроме того, следует иметь в виду, что характер реальных связей между изучаемыми признаками имеет нелинейную зависимость (Берлянд, 1985).

При составлении прогнозов загрязнения воздуха и повышения их достоверности и оправдываемости необходимо исключать из исходных данных случайные эффекты, создающие так называемый «шум», для чего используют различные методы фильтрации. Наиболее известные из них: метод, основанный на *теории оптимальной фильтрации Колмогорова и Винера*, с использованием уравнения Винера – Хопфа (Берлянд, 1985); метод *фильтрации Калмана* (Kalman, 1960).

При статистической обработке результатов и анализе случайных полей концентраций рядом авторов использовался *метод разложения на естественные неслучайные ортогональные функции* (Вавилова и др., 1969; Heseck, 1974; Peterson, 1970; Елекоева, Чувашина, 1979 и др.). Данный метод позволяет с наименьшей средней квадратической ошибкой аппроксимировать отклонение концентраций от среднего значения, которое является функцией координат и времени.

С целью преодоления трудностей установления статистических связей между загрязнением воздуха и соответствующими переменными необходимо учитывать одновременное влияние совокупности основных действующих факторов либо применять обобщенные данные о концентрации примесей в целом по городу. Полученные в результате наблюдений в разных точках населенного пункта в разные сроки данные значительно меньше подвержены случайным колебаниям, чем единичные данные о концентрации. Обобщенные данные по содержанию примесей отражают вклад преобладающих источников в загрязнение воздуха, а также фоновой концентрации загрязняющих веществ в городе, образующейся в результате их перемешивания (Берлянд, 1985). Обобщенные характеристики гораздо меньше зависят от режима выбросов и определяются преимущественно метеорологическими факторами. Получить усредненные характеристики можно путем расчета интегральных показателей. Данный метод имеет некоторое сходство с методами фильтрации случайных процессов.

Вышеперечисленные статистические методы прогноза основаны на установлении линейных связей между независимыми переменными и прогнозируемыми показателями. Однако фактическая зависимость между ними носит, как правило, нелинейный характер, что придает существенное значение методам нелинейной регрессии.

К одному из таких методов относится *метод обобщения авторегрессионных моделей*, основанный на использовании уравнения авто-

регрессии, в котором логарифмы концентраций заменены на концентрации и введены нелинейные параметры, такие как среднемесячная температура и скорость ветра. Использование нелинейных уравнений обеспечивает высокие (более 0,8) коэффициенты корреляции между прогнозируемыми и фактически измеренными концентрациями.

Метод последовательной графической регрессии используется для прогноза интегрального показателя загрязнения воздуха P и проводится в два этапа. На первом этапе строятся графики зависимости показателя P от двух параметров метеорологического воздействия на распространение примеси. На втором этапе осуществляется попарное объединение этих зависимостей. Метод позволяет установить зависимость загрязнения воздуха от всех рассматриваемых переменных. В качестве переменных могут быть выбраны разность температур на уровне подстилающей поверхности и на уровне изобарической поверхности AT_{925} , градиент потенциала на уровне 850 гПа и показатель исходного загрязнения воздуха P . При этом целесообразно сначала изучить за предшествующие годы характер связей между показателем загрязнения атмосферы в конкретном населенном пункте (например показателем P) и отдельными переменными или их комплексами.

В ряде случаев успешно использовался *метод группового учета аргументов*, предложенный А. Г. Ивахненко и В. Г. Лапой (1971), который представляет собой обобщение метода графической регрессии, где субъективное построение теоретических кривых заменено построением более объективных кривых по методу наименьших квадратов. В результате апробации данного метода установлено, что погрешность прогноза с увеличением заблаговременности возрастает несущественно, но точность прогноза при этом получается выше, чем при использовании линейной регрессии.

Метод распознавания образов, или *кластерный анализ*, основан на том, что результаты наблюдений за загрязнением воздуха и метеорологические параметры разбиваются на группы, соответствующие различным уровням загрязнения воздуха. Данный вид анализа активно разрабатывался в исследованиях систем автоматического контроля загрязнения воздуха. Прогнозирование проводится в три этапа. Подготовительный этап работы (обучение) состоит в группировке данных и ситуаций, а также в получении характеристик групп образов. Собственно этап прогноза заключается в определении расстояния до групп и прогнозировании степени загрязнения воздуха путем установления группы с минимальным расстоянием до ожидаемой ситуации. Последний этап заключается в проверке прогноза и представля-

ет, по сути, экзамен. Для проведения анализа исходные данные группируются в несколько кластеров, допускающих четкую интерпретацию. Оправдываемость прогноза методом кластерного анализа составляет до 80 % (Берлянд, 1985).

Наилучшие результаты дает сочетание метода кластерного анализа с дискриминантным анализом.

Для повышения эффективности статистических методов, по мнению ряда авторов (О расчете..., 1979; Математическое моделирование ..., 1981; Дымников, Алоян, 1984; Ашабоков, Шаповалов, 2008 и др.), их необходимо сочетать с более точными методами прогноза, например с численными. Так, для прогноза загрязнения воздуха от отдельных и групповых источников могут использоваться и непосредственные методы численного интегрирования уравнения атмосферной диффузии (Берлянд, 1985; Runca et al, 1979; Melli, Fronza, 1981).

Прогноз неблагоприятных условий погоды важно составлять заблаговременно. Причем чем раньше получен такой прогноз, тем больше возможностей по проведению необходимых мероприятий по минимизации последствий высокого загрязнения. На практике бывает достаточно ограничиться заблаговременностью в 1 сут. В то же время для отдельных периодов целесообразно составлять прогнозы и на более длительные сроки. В ряде случаев можно ограничиться и более короткими сроками – до нескольких часов.

Например, в США достаточно давно используется оперативный прогноз неблагоприятных для рассеивания примесей метеорологических ситуаций на ближайшие 12–36 ч. Такие прогнозы составляются ежедневно.

Однако во всех случаях требуется высокая достоверность прогнозов, поскольку на реализацию специальных мероприятий по результатам прогнозов могут потребоваться значительные затраты ресурсов вплоть до приостановления деятельности отдельных производств.

В целях получения качественных прогнозов загрязнения атмосферы необходимо составить прогнозы изменения метеорологических условий, влияющих на характер накопления и распространения загрязняющих веществ. Так, *прогноз устойчивости приземного слоя* может быть составлен на основе закономерностей суточного хода температуры с учетом общего синоптического прогноза погоды. При этом особое внимание надо уделить прогнозу развития облачности и адвективных изменений температуры.

Для *прогноза стратификации в нижнем слое атмосферы* в практике синоптической метеорологии обычно используются синоптическая

карта и карты барической топографии 850, 700 и 500 гПа, а также дополнительная карта 925 гПа. Последняя примерно соответствует высоте 700–800 м над уровнем моря и введена в качестве дополнения для уточнения данных в пограничном слое атмосферы. Такой подход позволяет уменьшить ошибку в определении верхней границы приземной инверсии почти в 2 раза (Берлянд, 1985). Прогноз составляется на срок 12, 24 и 36 ч.

Для составления *прогноза вертикального распределения ветра* при нормальных метеоусловиях достаточно учесть изменение скорости ветра с высотой по логарифмическому закону до высоты в несколько сотен метров. В указанных целях рассчитываются ожидаемые скорости ветра в приземном слое (обычно на уровне флюгера) и показатель шероховатости поверхности. Более точное определение вертикального профиля скорости ветра можно произвести на основе результатов теоретических исследований структуры пограничного слоя воздуха. Основой для этих расчетов является решение уравнений движения с учетом турбулентного обмена и силы Кориолиса.

Для составления *прогноза загрязнения атмосферы в аномальных условиях погоды*, способствующих накоплению примесей, важное значение имеет прогноз штилей и высоты их распространения. Большая повторяемость штиля может наблюдаться в целом ряде географических областей. При этом необходимо принимать во внимание, что сильное ослабление ветра наблюдается большей частью до высоты 20 м, исключение составляют районы резко континентального климата, например Сибирь.

Прогноз штилей основан на некоторых климатологических работах данных наблюдений за ветром на телебашнях и метеомачтах высотой несколько сотен метров. Проведенные исследования показали, что ослабление скорости ветра наблюдается не только в слое воздуха, контактирующем с земной поверхностью, но и в более высоких слоях.

На побережьях морей и крупных водоемов при прогнозировании загрязнения необходимо учитывать бризовую циркуляцию, в результате которой меняется направление ветра и может возникать неблагоприятная температурная стратификация. Образующаяся в таких условиях замкнутая циркуляция может приводить к возврату выбросов, поднявшихся над источником. Кроме того, бризы способствуют формированию на побережьях приподнятой инверсии с низко расположенной нижней границей, которая наблюдается в основном в первую половину дня и приводит к сильной загазованности воздуха.

Серьезное влияние на структуру воздушного потока оказывает рельеф, что также необходимо учитывать при составлении прогнозов.

Ввиду того, что большое влияние на распространение примесей оказывают туманы, важным является прогнозирование их образования. Условием появления туманов является перенасыщение воздуха водяным паром и достижение показателя относительной влажности воздуха 100 %. На практике условием образования тумана считают понижение температуры воздуха на уровне психрометрической будки (на высоте 2 м) до точки росы.

В последнее время всё большую опасность приобретает трансграничный (глобальный) перенос воздушных масс, наблюдаемый даже между континентами, что также необходимо учитывать при составлении прогнозов.

В целях прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха проводятся расчеты рассеивания выбросов загрязняющих веществ промышленных и иных предприятий на этапе проектирования намечаемой хозяйственной и иной деятельности, осуществляемого *природопользователями* самостоятельно либо с привлечением специализированных проектных организаций. При этом расчеты осуществляются в локальном масштабе для ограниченного количества источников выбросов как на этапе строительства объектов, так и их эксплуатации. В этом случае расчеты проводятся для территории промплощадки предприятия и зоны его негативного воздействия (санитарно-защитной зоны). В этих целях расчет рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе проводится для двухметрового слоя над поверхностью земли (среда обитания человека) на расстоянии не более 100 км от источника выброса, а также вертикального распределения концентраций примесей производится на основании Приказа Минприроды России от 06.06.2017 г. № 273 «Об утверждении Методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» (2017). Данные «Методы...» применяются:

- при определении нормативов выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух;
- разработке перечня мероприятий по охране окружающей среды в составе разделов проектной документации на строительство, реконструкцию и эксплуатацию различных хозяйственных и иных объектов;
- обосновании ориентировочных размеров санитарно-защитных зон промышленных предприятий;

- разработке и обосновании организационно-технических мероприятий, оказывающих влияние на уровень загрязнения атмосферного воздуха, при оценке их результатов;

- оценке воздействия намечаемой хозяйственной или иной деятельности на качество атмосферного воздуха;

- оценке краткосрочных и долгосрочных уровней загрязнения атмосферного воздуха и соответствующих концентраций загрязняющих атмосферу веществ, создаваемых всеми источниками выброса, исключая рассматриваемые (непосредственно учитываемые в расчете рассеивания выбросов), т. е. фоновые концентрации загрязняющих веществ.

«Методы...» (2017) позволяют рассчитывать:

- поля максимальных разовых концентраций загрязняющих веществ, соответствующих сочетанию неблагоприятных метеорологических условий, в том числе опасной скорости ветра, и неблагоприятных условий выброса примесей в атмосферный воздух, т. е. такого сочетания мощностей и других параметров выброса в атмосферный воздух (высота, диаметр устья, расход газовой смеси (ГВС), температура ГВС, скорость выхода ГВС из устья, мощность выброса), при котором в условиях соблюдения промышленным предприятием установленного режима работы достигаются максимальные значения максимальных приземных концентраций;

- поля безразмерных концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе групп веществ комбинированного вредного действия (полной суммации, неполной суммации, потенцирования);

- поля средних концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, соответствующих длительному (сезон, год) времени осреднения, в частности среднегодовых концентраций в атмосферном воздухе.

Климатические параметры, необходимые для расчетов согласно «Методам...» (2017), устанавливаются по климатическим данным, опубликованным для всеобщего доступа (в том числе климатическим справочникам) или предоставленным по заказу организациями, выполняющими работы по определению климатологических характеристик окружающей среды на основании лицензии на осуществление деятельности в области гидрометеорологии.

К числу метеорологических параметров, используемых для расчета рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе согласно «Методам...» (2017), относятся:

- максимальная расчетная скорость ветра, превышаемая в рассматриваемой местности в среднем многолетнем режиме в 5 % случаев, м/с;
- средняя многолетняя скорость ветра на исследуемой территории для холодного и теплого сезонов года, м/с;
- опасная скорость ветра с учетом влияния застройки, м/с;
- опасная скорость ветра на стандартной высоте флюгера (10 м от уровня земной поверхности), м/с;
- опасная скорость ветра, соответствующая максимальной концентрации загрязняющих веществ и определенная при параметрах выброса для одного ствола, м/с;
- измеренная в рассматриваемый срок скорость ветра на высоте 2 м, м/с;
- коэффициент турбулентного обмена K_I на уровне 1 м, м²/с;
- безразмерный параметр, характеризующий условия турбулентного перемешивания, равный отношению коэффициента турбулентного обмена K_I к скорости ветра на уровне 1 м/с;
- направление ветра, румб;
- среднегодовая повторяемость ветров румба, соответствующего направлению переноса загрязняющих веществ от источника выброса в расчетную точку, %;
- безразмерный коэффициент, учитывающий влияние колебаний направления ветра;
- коэффициент A , зависящий от температурной стратификации атмосферы, определяющий условия горизонтального и вертикального рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе;
- разность между температурой выбрасываемой газовой смеси и температурой окружающего воздуха, °С;
- средняя месячная температура воздуха за самый холодный месяц, °С;
- средняя максимальная температура воздуха наиболее теплого месяца года, °С;
- средняя абсолютная температура воздуха за рассматриваемый период, К;
- средняя интенсивность осадков за рассматриваемый период времени, мм/ч;
- коэффициент вымывания рассматриваемых загрязняющих веществ твердыми либо жидкими осадками интенсивностью 1 мм/ч;
- скорость гравитационного осаждения частиц в атмосферном воздухе, м/с;
- плотность атмосферного воздуха, кг/м³;

- данные градиентных наблюдений: регулярные срочные наблюдения за основными метеозементами (температурой и влажностью атмосферного воздуха, скоростью ветра), производимые одновременно на нескольких высотах в приземном слое атмосферного воздуха на теплорбалансовых станциях.

Программы для ЭВМ, используемые для расчетов рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, должны быть лицензионными и подлежат экспертизе, которая проводится Федеральной службой Росгидромета.

Прогнозирование загрязнения атмосферного воздуха проводится также при проведении государственного экологического мониторинга Федеральной службой Росгидромета и ее территориальными подразделениями. Прогнозы составляются для территории всего населенного пункта либо какой-то его части или конкретного предприятия. В отношении крупных предприятий, занимающих большие территории, прогнозы могут составляться для отдельных цехов и производственных участков (например для металлургических заводов и нефтегазодобывающих производств).

В настоящее время составление прогнозов загрязнения атмосферного воздуха подразделениями Федеральной службы Росгидромета проводится в соответствии с РД 52.04.306-92 «Атмосфера. Руководство по прогнозу загрязнения атмосферного воздуха» (1992), согласно которому методы прогнозирования различаются для *отдельных источников, совокупности источников и города в целом*.

При составлении прогнозов для каждого *отдельного источника* выявляются неблагоприятные метеорологические условия (НМУ), приводящие к высокому уровню загрязнения приземного слоя атмосферы. Для этого определяются опасные направления ветра, приводящие к относительно высокому уровню загрязнения воздуха, когда выбросы переносятся на городские районы от источника, расположенного на окраине или за пределами города; максимальному наложению выбросов ряда источников; переносу выбросов на районы города с плотной застройкой и со сложным рельефом местности, где концентрация примесей в приземном слое воздуха растет под влиянием местных условий. Далее рассчитываются опасные скорости ветра для разных типов источников: с горячими выбросами, холодными выбросами, линейных источников. В случае поступления примесей из множества источников с разными параметрами, наряду с опасной скоростью ветра, средневзвешенная опасная скорость ветра рассчитывается для каждого из них. Также важным является определение высоты нижней границы приподнятой инверсии, с которой связано

формирование опасных концентраций, в том случае, если она расположена выше источника выброса, но не более чем 300 м над ним.

При прогнозировании уровня загрязнения воздуха от *совокупности источников* собираются сведения о параметрах выбросов со всех предприятий, расположенных на обслуживаемой территории (РД 52.04.306-92, 1992). При этом для основных источников выполняется расчет максимальных концентраций примесей в воздухе и определяются те предприятия, в отношении которых необходимо проводить метеорологическое обслуживание, в том числе определение опасной скорости ветра и комплекса НМУ.

При этом источники загрязнения воздуха группируются и для каждой из групп определяются НМУ. Необходимые данные берут из томов предельно допустимых выбросов (ПДВ).

Аномально неблагоприятные метеоусловия для основных групп источников согласно РД 52.04.306-92 (1992) приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Аномально неблагоприятные метеорологические условия
для основных групп источников выбросов в атмосферу
(согласно РД 52.04.306-92, 1992)

Характеристика выбросов	Термическая стратификация нижнего слоя атмосферы	Скорость ветра на уровне, м/с		Вид инверсии (ее высота над источником, м)
		флюгера	выбросов	
Горячие высокие	Неустойчивая	3–7 Штиль	5–10 5–10	Приподнятая (100–300 м)
Холодные высокие	Неустойчивая	1–2 Штиль	2–4 2–4	Приподнятая (100–300 м)
Низкие	Устойчивая	Штиль	Штиль	Приземная

Комплексы НМУ предлагается сформулировать так, чтобы каждый параметр предсказывался на срок до 36 ч. При прогнозе высоты нижней границы приподнятой инверсии учитывается близость к ней высоты слоя перемешивания.

Дополнительно учитываются следующие комплексы НМУ:

- высота слоя перемешивания менее 500 м, но больше высоты источника в сочетании со скоростью ветра, близкой к опасной для данного источника;

- туман и штиль – для холодных выбросов, туман и скорость ветра более 2 м/с – для горячих выбросов;

- направление ветра в сторону кварталов плотной застройки или районов со сложным рельефом в сочетании со скоростью ветра, близкой к опасной;
- направление ветра, при котором имеет место максимальное наложение выбросов от группы источников, в сочетании со скоростью ветра, близкой к опасной;
- штиль в сочетании с приземной инверсией – для низких источников.

В процессе прогнозирования источники группируют на низкие (их большинство в городе) и высокие. Иногда в отдельную группу включают трубы городских котельных, занимающих промежуточное положение.

Для конкретной территории на синоптической карте на основе составленного прогноза скорости и направления ветра, высоты слоя перемешивания, туманов с учетом синоптической обстановки выделяются области с НМУ для отдельных групп источников.

Предупреждение о НМУ передается на то предприятие, источники выбросов которого оказываются в соответствующей области. Например, если в некоторой области над северо-восточной частью заданной территории ожидается ветер 4–7 м/с и приподнятая инверсия с нижней границей 300–500 м, то предупреждения о необходимости временно снижать выбросы передаются на все расположенные в данной области высокие источники с нагретыми выбросами, которые в соответствии с ожидаемым направлением ветра будут переноситься на жилые кварталы. Если, например, в южной части этого региона расположена ось малоподвижного гребня и ожидаются штиль и приземная инверсия в течение большей части суток, то предупреждения здесь относятся ко всем низким источникам (автотранспорт, небольшие котельные, низкие источники выбросов промышленных предприятий и др.).

Расчеты на ЭВМ позволяют установить неблагоприятные сочетания направления и скорости ветра, при которых формируется загрязнение воздуха от многих отдельных источников. Расчеты полей концентраций и установление неблагоприятных сочетаний направления и скорости ветра проводятся с использованием данных об инвентаризации выбросов. На основе этих расчетов уточняются НМУ в конкретном городе. При наличии метеорологического прогноза направления и скорости ветра определяются те районы города или области, где могут формироваться наибольшие концентрации примесей в воздухе.

Для составления прогнозов *по городу в целом* изучаются метеорологические условия, определяющие уровни загрязнения, и разрабатываются статистические схемы. При этом в качестве зависимых переменных в схемах прогноза используются интегральные показатели, в частности параметр P , который определяется для совокупности примесей, а при достаточном количестве измерений в течение дня – для отдельных примесей. В больших городах интегральные показатели загрязнения и прогностические схемы рассчитываются и составляются для отдельных районов. При этом необходимо использовать данные наблюдений не менее чем на трех постах.

Используемые в настоящее время варианты статистических схем позволяют определять значение интегрального показателя P . В соответствии с РД 52.04.306-92 (1992) в первую очередь рекомендуется определить группу загрязнения воздуха по городу в целом согласно табл. 4.2.

Таблица 4.2

Группы загрязнения воздуха по городу в целом
(согласно РД 52.04.306-92, 1992)

Номер группы	Градация параметра P	Характеристика загрязнения воздуха	Средняя повторяемость, %
I	$> 0,35$	Относительно высокое	10
II	$0,21-0,35$	Повышенное	40
III	$\leq 0,20$	Пониженное	50

Группы загрязнения воздуха, приведенные в табл. 4.2, установлены по результатам наблюдения в ряде городов. При этом градации в каждом городе целесообразно уточнять. В случае, если статистическое распределение параметра P отличается от его табличного значения, то границы между группами могут быть другими. Главным будет являться примерное сохранение указанной повторяемости: 10 % – для I группы, 40 % – для II группы, 50 % – для III группы.

Кроме трех групп загрязнения воздуха, отдельно предсказываются случаи аномально высокого загрязнения воздуха (АВЗВ), которые включают 2 % наибольших значений параметра P .

Прогнозы загрязнения воздуха составляются для совокупности примесей и отдельных примесей, наиболее характерных для данного города. Схемы прогнозов разрабатывают отдельно для разных сезонов года. Поскольку в переходные сезоны метеорологический режим подвержен значительной изменчивости, целесообразно составлять три варианта схем:

- для зимнего (декабрь-февраль) и летнего (июнь-август) сезонов с использованием (после предварительной проверки такой возможности) соседних месяцев переходных сезонов;
- для холодного и теплого полугодий;
- отдельно для всех четырех сезонов.

При этом в качестве независимых переменных в весенний и осенний сезоны не следует использовать параметры, имеющие большую амплитуду годового хода (температуру воздуха, характеристики термической устойчивости атмосферы в дневные часы).

Прогностические схемы разрабатываются отдельно для первой и второй половины дня, а также для всего дня в целом. При скользящем режиме работы стационарных постов наблюдений составление схемы для первой половины дня проводится по данным наблюдений в 7, 10 и 13 часов, а для второй половины дня – в 15, 18 и 21 час. При отборах проб в постоянные сроки в 7, 13, 19 часов составление схемы для первой половины дня проводится по данным наблюдений в 7 и 13 часов, для второй половины дня – в 13 и 19 часов, для всего дня – в 7, 13 и 19 часов. При достаточном количестве наблюдений (не менее чем на 8 постах) схемы могут составляться отдельно для каждого срока (РД 52.04.306-92, 1992).

Перед тем как составлять прогностические схемы, необходимо выбрать независимые переменные, которые должны характеризовать главные метеорологические факторы, определяющие уровень загрязнения воздуха в городе, и исходное загрязнение. Из возможных переменных выбирается несколько наиболее значимых.

К основным переменным, определяющим формирование уровня загрязнения атмосферы, относятся направление переноса примесей, скорость их переноса, атмосферная устойчивость и связанная с ней степень вертикального перемешивания примесей, термическое состояние воздушной массы, от которого зависит начальный подъем выбросов, вымывание примесей осадками, аккумуляция их в туманах, инерционный фактор.

При составлении прогнозов рекомендуется использовать наблюдения основной метеостанции города и пункта радиозондирования атмосферы, который обычно находится за пределами города. Это позволяет устанавливать связь загрязнения городского воздуха с характеристиками пограничного слоя атмосферы, не искаженными самим городом.

Направление и скорость ветра определяются на высоте флюгера на основной метеостанции города. Кроме этого, в схемы может включаться скорость ветра на уровне изобарической поверхности AT_{925} ,

что позволяет учитывать влияние на состояние загрязнения воздуха скорости ветра не только на высоте флюгера, но и на более высоком уровне в пограничном слое атмосферы. В качестве независимой переменной может использоваться также средняя скорость ветра в слое перемешивания.

В качестве характеристик атмосферной устойчивости принимаются показатели:

- ΔT – разность температуры между уровнями земли и изобарической поверхности AT_{925} ;

- H_n – высота слоя перемешивания.

При наличии инверсии, когда $H_n = 0$, в прогностические схемы включается показатель ΔT . Если преобладают ситуации с $H_n > 0$, то выбирается одна из двух указанных характеристик в зависимости от того, какая из них более тесно коррелирует с уровнем загрязнения атмосферы в данном конкретном городе.

В целом в качестве независимых переменных можно использовать:

- скорость ветра на высоте флюгера, м/с;
- направление ветра;
- скорость ветра на уровне изобарической поверхности AT_{925} , м/с;
- среднюю скорость в слое перемешивания, м/с;
- разность температур на уровне земли и AT_{925} , °С;
- температуру воздуха у земной поверхности, °С;
- высоту слоя перемешивания, м (иногда вместо нее используется высота слоя термодинамического перемешивания, которая характеризует процесс вертикального обмена, определяемый как термической стратификацией, так и вертикальным сдвигом ветра);
- нижнюю границу приподнятой инверсии, м (если инверсия приземная, то этот показатель равен нулю);
- мощность приземной инверсии, м (при отсутствии приземной инверсии она равна нулю);
- градиент приземного давления, гПа/градус меридиана);
- исходное значение параметра P и др.

Наиболее распространенный вариант включения независимых переменных в прогностические схемы заключается в следующем: для первой половины дня и для всего дня в качестве независимых переменных принимаются характеристики пограничного слоя атмосферы за 3 ч (по данным радиозонда), а метеорологические параметры в приземном слое воздуха (по данным метеостанции) – за 6 ч, для второй половины дня и те и другие параметры берутся за 15 ч. При таком подходе для составления прогнозов на следующий день

необходимо предсказывать метеорологические переменные. В то же время для составления уточненных прогнозов уровня загрязнения воздуха (на 6–8 ч) в схему прогноза добавляют данные измерений метеорологических характеристик.

Для повышения значимости независимых переменных и успешности схем прогноза уровня загрязнения воздуха используются комплексные переменные, например, на основе теории информации. Такие переменные представляют собой линейные сочетания исходных переменных.

После выполнения предварительных разработок устанавливаются прогностические правила, основанные на изучении комплексов метеорологических параметров и синоптических ситуаций, определяющих уровень загрязнения воздуха. Такие комплексы и ситуации определяются на основании анализа связей между интегральным показателем загрязнения воздуха в городе и метеорологическими факторами. Существенными в практическом отношении являются выводы о возможном росте или уменьшении уровня загрязнения воздуха в связи с изменениями метеорологических характеристик.

В РД 52.04.306-92 (1992) содержится ряд правил, которые оказались сходными для группы городов.

Высокие уровни загрязнения воздуха ($P > 0,35$) формируются при следующих условиях:

1) в ночные и утренние часы наблюдается ситуация застоя воздуха (штиль и приземная инверсия), а в предшествующий день отмечается повышенное значение параметра P ($P' > 0,3$). Данные условия могут осуществляться в любую часть года;

2) в дневные часы (по данным наблюдений за 15 ч) отмечается застой воздуха. В предшествующий день параметр $P' > 0,15$. Дневные застои воздуха наблюдаются обычно в период ноябрь-март;

3) ситуация с умеренным ветром (3–6 м/с) и неустойчивой термической стратификацией в дневные часы сменяется условиями застоя воздуха вечером; $P' > 0,15$. Такая ситуация чаще всего наблюдается в теплую часть года, однако может иметь место и зимой, особенно в южных городах;

4) во второй половине предшествующего дня параметр $P' > 0,4$, а в последующий день в соответствии с метеорологическим прогнозом не ожидается заметного усиления ветра (более чем на 3–4 м/с) или выпадения значительных осадков;

5) скорость ветра 0–1 м/с сопровождается туманом;

6) формирование или сохранение стационарного антициклона при параметре $P' > 0,2$.

При этом высокие уровни загрязнения не наблюдаются в случаях:

- если в холодную половину года, а также летом в ночные и утренние часы при скорости ветра 0–1 м/с отсутствует приземная инверсия;

- при быстром перемещении антициклонов и гребней.

Относительно пониженное загрязнение воздуха ($P \leq 0,20$) отмечается при следующих условиях:

- ветер на уровне флюгера превышает 5–6 м/с;
- выпадение умеренного или сильного дождя (при выпадении снега очищение воздуха происходит менее эффективно, чем при дожде);
- независимо от метеорологических условий во второй половине предшествующего дня параметр $P' < 0,15$;
- вторжение в рассматриваемый район развитого циклона.

Оправдываемость указанных правил в случае прогноза высокого уровня загрязнения воздуха составляет около 70 %, а в случае прогноза его отсутствия или пониженного загрязнения воздуха – более 90 %. Это существенно выше оправдываемости случайных и инерционных прогнозов.

В практической работе целесообразно использовать качественные выводы о возможном изменении уровня загрязнения воздуха, основанные на результатах физических исследований и анализе фактического материала. Так, например, известно, что к повышению уровня загрязнения воздуха приводят:

- 1) усиление устойчивости нижнего слоя атмосферы при слабом ветре (за счет вклада низких источников);
- 2) ослабление ветра при устойчивой термической стратификации;
- 3) усиление ветра от 0 до 3–6 м/с при неустойчивой стратификации;
- 4) рост температуры воздуха при слабом ветре (не выше 5 м/с);
- 5) образование туманов;
- 6) увеличение антициклонической кривизны приземных изобар;
- 7) адвекция тепла в тропосфере.

К снижению уровня загрязнения воздуха приводят:

- 1) усиление ветра при устойчивой термической стратификации;
- 2) выпадение осадков;
- 3) увеличение циклонической кривизны приземных изобар;
- 4) адвекция холода в тропосфере;
- 5) прохождение холодного фронта.

Согласно РД 52.04.306-92 (1992) работы по прогнозированию уровня загрязнения воздуха должны быть организованы во всех горо-

дах, где максимальная измеренная или расчетная концентрация хотя бы для одной из примесей превышает ПДК.

При организации работ по прогнозу загрязнения воздуха в городах, где ранее они не составлялись, учитывается уровень концентрации примесей по данным измерений за последние 2 года. В первую очередь целесообразно прогнозировать загрязнение воздуха для тех городов, где хотя бы по одной из примесей максимальная концентрация превышает 5 ПДК.

Прогноз загрязнения воздуха для обслуживаемой территории обычно составляется в региональном прогностическом центре. При необходимости работы по прогнозированию могут быть организованы и в отдельных городах территории региона.

При составлении прогнозов загрязнения воздуха в городах, где ранее они не разрабатывались, необходимо исходить из следующих положений:

1) в городах, где регулярные наблюдения за концентрациями нескольких примесей проводятся не менее чем на трех постах, разрабатываются статистические схемы и на их основании проводится прогнозирование загрязнения воздуха по городу в целом. Одновременно в таких городах осуществляется прогноз загрязнения от отдельных источников. Если постов в городе не менее семи, то дополнительно разрабатываются прогностические схемы и проводится практическое прогнозирование по городу в целом для отдельных примесей;

2) в городах, где регулярные наблюдения за концентрациями проводятся на одном-двух постах, основным является прогнозирование уровня загрязнения воздуха от отдельных источников. Одновременно на основе предварительных разработок прогнозируются метеорологические и синоптические условия, определяющие высокие и низкие уровни загрязнения в городе;

3) в городах, где отсутствуют регулярные наблюдения за концентрациями, но известно (на основе расчетов, эпизодических измерений или качественной оценки), что состояние воздушного бассейна неблагоприятно, прогнозирование проводится для отдельных источников, определяющих уровень загрязнения воздуха.

В первую очередь организуется прогнозирование загрязнения воздуха от крупных промышленных объектов, являющихся основными источниками выбросов в воздушный бассейн города. Устанавливаются параметры этих объектов на основе данных по инвентаризации источников выбросов (количество труб, их высота и диаметр, количество выбрасываемых примесей, объем выхода газозооной смеси в единицу времени, скорость её выхода из труб, температура

выбросов). По полученным данным рассчитываются максимальные концентрации примесей при нормальных метеорологических условиях, анализируются результаты наблюдений под факелами рассматриваемых предприятий, а также стационарных наблюдений при направлении ветра со стороны источника на пункт отбора проб. На основании анализа расчетных и измеренных концентраций делается вывод о вкладе источников в уровень загрязнения воздуха в городе.

Для каждого источника выбросов определяются опасные скорость и направление ветра. При выборе источников для метеорологического обслуживания и составления прогнозов предпочтение отдается предприятиям, расположенным на окраине или за пределами города. В этом случае предсказание опасных условий загрязнения воздуха делать проще.

В конечном итоге при составлении прогноза должны быть охвачены все источники выбросов, дающие вклад в создание приземных концентраций.

Для составления статистической схемы прогноза загрязнения воздуха по городу в целом необходимы данные наблюдений не менее чем за 3 года. Прогностические правила затем проверяются и уточняются.

При ежедневном оперативном прогнозировании, наряду с прогностической схемой и прогностическими правилами (комплексами метеорологических переменных и синоптическими ситуациями), используются качественные правила, указывающие на возможные изменения уровня концентраций. Такой подход наиболее актуален для тех городов, где данных регулярных измерений недостаточно для составления статистической схемы.

Прогнозы загрязнения воздуха составляются специально выделенными в каждом территориальном органе Росгидромета группами. Группы могут создаваться и в периферийных центрах по гидрометеорологии. Однако здесь допустимо ограничиться назначением ответственного за прогнозирование загрязнения воздуха и подключением к этой работе дежурных инженеров-синоптиков.

Перед составлением прогноза загрязнения воздуха предварительно выполняются два вида работ:

- 1) предсказываются необходимые для прогноза загрязнения воздуха метеорологические условия. В первую очередь рассматривается имеющийся прогноз погоды общего пользования. По возможности уточняется прогноз отдельных метеозлементов: направления и скорости ветра, температуры воздуха и др. При этом учитываются прогностические синоптические карты, в том числе полученные на основе

численного прогноза. Специально для данной задачи предсказывается термическая стратификация атмосферы, в том числе приземные и приподнятые инверсии, толщина слоя перемешивания в различные часы суток, скорость ветра на изобарической поверхности 925 гПа;

2) проводится тщательный анализ всей исходной информации о загрязнении воздуха на территории обслуживаемых городов различными примесями, в том числе специфическими вредными веществами. К прогнозисту должна поступать вся информация о концентрациях примесей в воздухе в исходный момент времени, в том числе данные наблюдений со стационарных и маршрутных постов, а также подфакельных наблюдений. Кроме того, устанавливаются те районы, где отмечаются высокие концентрации различных примесей в воздухе. По возможности определяются источники выбросов, являющиеся причиной высоких концентраций. Прогнозисты анализируют сведения о расположении основных источников загрязнения воздуха в городе, о параметрах выбросов, в первую очередь о количестве поступающих в атмосферу примесей, в том числе специфических, о высоте их поступления. Также прогнозисты должны иметь расчетные значения максимальных концентраций; знать расстояния от источников выбросов с максимальной концентрацией; диапазон расстояний, где расчетная концентрация близка к максимальной; значения опасной скорости ветра для основных источников города.

В заданных точках города, используя материалы регулярных наблюдений, рассчитывают исходное значение параметра P или иного показателя загрязнения воздуха по городу в целом.

После этого составляется прогноз загрязнения воздуха двух видов: от отдельных источников и по городу в целом.

Для прогноза загрязнения воздуха от отдельных источников сначала предсказываются все метеорологические параметры, входящие в неблагоприятные комплексы, а затем делается вывод о возможности формирования высоких уровней загрязнения воздуха за счет выбросов обслуживаемых объектов.

Прогноз загрязнения воздуха по городу в целом составляется с использованием статистической схемы и прогностических правил.

Прогнозы составляются 2 раза в сутки: утром (до 10 часов) – на текущий день и во второй половине дня (в 13–15 часов) на следующий день. Одновременно с прогнозом на следующий день составляется уточненный прогноз на конец дня и на вечер. Если ожидается высокий уровень загрязнения воздуха, то вместе с прогнозом дается предупреждение о наступлении НМУ, которое направляется потребителям. Если по городу в целом и для отдельных источников выбросов

высокого загрязнения воздуха не ожидается, то результаты прогноза записываются в журнал и потребителям не передаются.

После передачи потребителям предупреждения о НМУ, начиная с момента их наступления, в прогностическом центре устанавливается контроль за изменениями ключевых метеорологических и аэрологических характеристик: скорости и направлении ветра у земной поверхности и в нижнем слое атмосферы (до 300–500 м); вертикальном распределении температуры в указанном слое по данным ближайшей метеостанции, с пункта шаропилотных наблюдений, с пункта радиозондирования, а также с телебашни, если на ней ведутся метеорологические наблюдения.

По данным аэрологических наблюдений отслеживается последовательное изменение скорости ветра, ведущее к штилевым условиям, определяется верхняя граница штилевой зоны, дается заключение о направленности изменений скорости ветра, о наличии инверсии и ее положении относительно эффективной высоты источника.

Контроль за метеорологическими условиями продолжается до исчезновения опасной ситуации. Параллельно осуществляется непрерывный контроль за состоянием загрязнения воздуха в обслуживаемых городах.

Наряду с указанными работами специалисты прогностических групп анализируют эффективность предупреждений о НМУ. Анализ проводится с использованием данных о концентрациях примесей в воздухе, об интегральных показателях загрязнения воздуха, а также сведений о реальном выполнении мероприятий при НМУ. Проводится оценка качества прогнозов загрязнения воздуха, специально выполняется анализ неоправдавшихся прогнозов и непредсказанных опасных эпизодов.

Задачами прогнозистов являются составление и усовершенствование схем прогноза, их детализация, повышение заблаговременности и увеличение точности прогнозов, а также согласование разработанных на предприятиях мероприятий по регулированию выбросов в периоды НМУ.

Специалисты по прогнозу загрязнения воздуха территориальных управлений Федеральной службы Росгидромета также осуществляют методическое руководство данными работами в периферийных подразделениях на обслуживаемой территории.

Важным условием успешного прогнозирования загрязнения воздуха является своевременное поступление прогнозистам оперативной информации о загрязнении воздуха, в том числе:

- ежедневной, необходимой для расчета обобщенной характеристики загрязнения воздуха по городу в целом и для оценки сложившейся обстановки в городе;
- дополнительной, содержащей результаты измерений концентраций примесей в воздухе в период НМУ.

Для составления качественных прогнозов важное значение имеет использование результатов химического анализа проб воздуха. Основное требование при этом заключается в его оперативности и представлении результатов анализа в прогностическое подразделение не позднее чем через 4 часа после выполнения измерений. Для этого целесообразно организовать двухсменную работу химической лаборатории. При работе аналитической лаборатории в одну смену результаты измерения концентраций за 7 ч текущего дня и 19 ч предыдущего дня поступают к прогнозисту к 11 часам следующего дня, за 13 ч – к 17 часам текущего дня. Указанный подход сохраняется при выполнении измерений по скользящему графику.

При высоком уровне загрязнения воздуха в городе наблюдения проводятся на стационарных постах через каждые 3 ч в течение всего периода действия предупреждения о НМУ.

В течение периода НМУ при ожидаемом высоком уровне загрязнения воздуха от отдельных источников наблюдения за концентрациями основных выбрасываемых примесей под факелами предприятий проводятся через каждые 2 ч. Отбор проб при этом проводится не менее чем в двух точках вблизи точки ожидаемого максимума концентраций.

Отобранные на стационарных постах и под факелами источников пробы доставляются в химическую лабораторию, где немедленно анализируются, значения концентраций сообщаются в прогностический центр.

Если стационарные посты наблюдений Федеральной службы Росгидромета, имеющиеся в городе, попадают в зону максимальных значений концентраций от факела промышленного предприятия, то на таких постах наблюдения проводятся через каждые 3 ч в течение всего периода сохранения неблагоприятной ситуации для данного предприятия.

При составлении прогнозов также используют данные автоматизированных систем контроля загрязнения атмосферы. При наличии в городе такой системы информация о концентрациях примесей на стационарных постах ежечасно поступает к прогнозистам. С помощью этих данных устанавливаются пространственное распределение загрязнения по территории города и характер его временных измене-

ний. Наряду с единичными концентрациями автоматизированная система ежечасно выдает значение обобщенного по городу показателя загрязнения воздуха за последние 6 ч для отдельных примесей и их совокупности.

Включение в прогностическую схему оперативно рассчитанных значений обобщенных показателей (P и других) за самые последние часы способствует повышению эффективности прогнозов.

Автоматизированная система контроля загрязнения атмосферы включает прогностический блок, который позволяет рассчитывать обобщенный показатель загрязнения воздуха по городу в целом и составлять статистический прогноз. Такой прогноз выдается не менее 4 раз в сутки, из них 2 раза – в периоды составления основного и уточненного прогноза.

При автоматическом измерении концентраций всех примесей ограничиваются прогнозами, которые выдает система, а при возможных резких изменениях метеорологических условий (выход активного циклона, прохождение фронта и др.) в дополнение учитывается их влияние на уровень загрязнения воздуха.

Для составления прогнозов загрязнения воздуха с использованием автоматизированной системы применяются статистические схемы, разработанные по методу множественной линейной регрессии с предварительным исключением нелинейности связей и по методу распознавания образов.

Контрольные вопросы

1. В чем особенность численных методов прогноза?
2. В чем особенность статистических методов прогноза?
3. Для чего применяют фильтрацию при составлении прогнозов загрязнения воздуха?
4. Что является показателем эффективности прогноза загрязнения воздуха?
5. Какие метеорологические параметры используются для расчета рассеивания выбросов загрязняющих веществ?
6. Каким нормативным документом регламентируется составление прогнозов загрязнения атмосферного воздуха подразделениями Федеральной службы Росгидромета?
7. Каким нормативным документом регламентируется порядок расчета рассеивания выбросов природопользователями?
8. Какие выделяются группы загрязнения воздуха по городу в целом и чем они характеризуются?

5. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА И МЕРОПРИЯТИЯ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ ВЫБРОСОВ В ПЕРИОД НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Охрана атмосферного воздуха от негативного воздействия – одно из важнейших направлений природоохранной политики государства.

Основным нормативно-правовым актом в области охраны атмосферного воздуха является Федеральный закон от 04.05.1999 г. № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» (1999).

В целях обеспечения охраны атмосферного воздуха от негативного воздействия проводится контроль его качества, ключевыми инструментами которого являются мониторинг атмосферного воздуха и производственный контроль за охраной атмосферы.

Требования к организации и проведению мониторинга атмосферного воздуха содержатся в ст. 23 Федерального закона от 04.05.1999 г. № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха».

Оценка качества атмосферного воздуха в рамках государственного экологического мониторинга проводится силами государственной сети наблюдений Федеральной службы Росгидромета, которая является единственным уполномоченным органом, ведущим непрерывное слежение за состоянием атмосферного воздуха.

На территории уральского региона контроль качества воздуха проводит ФГБУ «Уральское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». Сеть мониторинга загрязнения атмосферы на территории его деятельности охватывает 13 городов, в которых имеются 52 стационарных поста наблюдений за загрязнением атмосферы (ПНЗ) государственной наблюдательной сети (http://svgimet.ru/?page_id=181).

На территории Свердловской области государственная сеть мониторинга загрязнения атмосферы включает 18 стационарных постов в пяти городах: Екатеринбург (8 постов), Нижний Тагил (4 поста), Первоуральск (2 поста), Каменск-Уральский (2 поста), Краснотурьинск (2 поста). В Курганской области регулярные наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха проводятся в г. Кургане на 5 стационарных постах. На территории Пермского края государственная сеть мониторинга загрязнения атмосферы включает 14 стационарных постов в четырех городах: Пермь (7 постов), Березники (2 поста), Губаха (2 поста) и Соликамск (3 поста). Сеть мониторинга загрязнения

атмосферы на территории Челябинской области насчитывается 15 стационарных постов в трех городах: Челябинск (8 постов), Магнитогорск (5 постов), Златоуст (2 поста).

На всех стационарных постах регулярно производится отбор проб атмосферного воздуха, в том числе разовых (4 пробы в сутки через равные промежутки времени), среднесуточных (1 проба в сутки с аспирацией воздуха дискретно через равные промежутки времени) и среднемесячных (1 проба в месяц с аспирацией воздуха дискретно). Наблюдения ведутся за содержанием в атмосферном воздухе основных и специфических загрязняющих веществ, в том числе взвешенных веществ, диоксида серы, оксида углерода, диоксида и оксида азота, углерода, формальдегида, фенола, аммиака, изопропилового спирта, сероводорода, фторидов твердых, фторида водорода, хлорида водорода, хлора, цианистого водорода, хрома шестивалентного, на которые установлен разовый отбор проб; бензольных углеводородов (бензол, ксилол, толуол, этилбензол), на которые установлен среднесуточный или разовый отбор проб; бенз(а)пирена (среднемесячный отбор проб); тяжелых металлов (свинец, кадмий, медь, цинк, никель, хром общий, марганец, железо, магний), на которые установлен среднесуточный или среднемесячный отбор проб.

Обработка и обобщение данных о загрязнении атмосферы и оценка уровней загрязнения проводится в соответствии с РД 52.04.667-2005 «Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению, содержанию» (2005).

Для проведения количественного химического анализа атмосферного воздуха в составе подразделений Росгидромета имеется целая сеть специализированных аналитических лабораторий. Для оценки качества атмосферного воздуха используются основные статистические показатели, характеризующие загрязнение атмосферы и рассчитанные для различного осреднения по времени и пространству, в том числе:

$q_{\text{макс}}$ – максимальные концентрации примесей: разовых, измеренных за 20 мин, среднесуточных или среднемесячных (мг/м^3 или мкг/м^3 ; доли ПДК);

$q_{\text{ср}}$ – средние концентрации примесей (мг/м^3 или мкг/м^3 ; доли ПДК);

g – повторяемость концентраций примеси выше 1 ПДК, %;

g_I – повторяемость концентраций примеси выше 5 ПДК, %.

Степень загрязнения примесью оценивается при сравнении её концентрации с соответствующим значением предельно допустимой концентрации ($ПДК_{мр}$ – максимальная разовая ПДК; $ПДК_{сс}$ – среднесуточная ПДК). При этом разовые концентрации загрязняющих веществ сравнивают со значением $ПДК_{мр}$, среднесуточные, среднемесячные и среднегодовые концентрации – со значением $ПДК_{сс}$.

Под ПДК понимается предельно допустимая концентрация примеси, установленная Минздравом России (ГН 2.1.6.3492-17 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений» (2017).

Среднесуточные концентрации этилбензола сравниваются с максимальной разовой ПДК ($ПДК_{мр}$) этого вещества в соответствии с ГН 2.1.6.3492-17 в связи с отсутствием в указанном документе среднесуточной ПДК ($ПДК_{сс}$) этилбензола.

Для оценки качества атмосферного воздуха используются три основных показателя качества воздуха:

- *стандартный индекс (СИ), или наибольший единичный индекс загрязнения*, – максимальная измеренная за рассматриваемый период времени концентрация примеси, делённая на соответствующее значение ПДК (безразмерный показатель);
- *наибольшая повторяемость (НП) превышений ПДК, %*;
- *комплексный индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) приоритетными веществами, определяющими состояние загрязнения в городе*.

Оценка уровней загрязнения атмосферного воздуха проводится по четырем категориям: низкий, повышенный, высокий и очень высокий. Уровень загрязнения атмосферного воздуха в городе в течение года определяется по максимальному значению одного из двух критериев: СИ, НП. Уровень загрязнения атмосферного воздуха в городе за год определяется по максимальному значению одного из трех критериев: СИ, НП, ИЗА. При этом если ИЗА, СИ и НП попадают в разные категории, то степень загрязнения воздуха оценивается по ИЗА. Допускается корректировка категории качества атмосферного воздуха «низкий» или «повышенный» уровень загрязнения (по комплексному ИЗА) в сторону увеличения оценки степени загрязнения, если показатели СИ > 10 или НП > 20 %.

В табл. 5.1 приведены уровни загрязнения атмосферного воздуха в зависимости от значения показателей его качества.

Таблица 5.1

**Уровни загрязнения воздуха в зависимости
от значения показателей его качества**

Показатель	I категория <i>Низкий</i>	II категория <i>Повышенный</i>	III категория <i>Высокий</i>	IV категория <i>Очень высокий</i>
СИ	0–1	2–4	5–10	> 10
НП	0	1–19	20–49	> 50
ИЗА	0–4	5–6	7–13	> 14

Деятельность в области мониторинга и контроля загрязнения атмосферы может осуществляться также иными предприятиями на основе лицензий, выданных Федеральной службой Росгидромета. При этом все предприятия-лицензиаты обязаны предоставлять результаты всех своих наблюдений в фонд данных Росгидромета в установленном законом порядке.

Другим важным направлением контроля качества атмосферного воздуха является производственный контроль за охраной атмосферы, который, согласно ст. 25 Федерального закона от 04.05.1999 г. № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха», обязаны осуществлять юридические лица и индивидуальные предприниматели, имеющие источники вредных химических, биологических и физических воздействий на атмосферный воздух. Для осуществления указанных целей юридические лица и индивидуальные предприниматели обязаны назначать ответственных лиц и (или) организовывать экологические службы и осуществлять охрану атмосферного воздуха в соответствии с законодательством Российской Федерации.

Сведения о лицах, ответственных за проведение производственного контроля за охраной атмосферного воздуха, и об организации экологических служб на объектах хозяйственной и иной деятельности, а также результаты производственного контроля представляются в органы государственного экологического надзора.

На объектах I категории по степени экологического риска стационарные источники выбросов должны быть оснащены автоматическими средствами измерения и учета параметров выбросов, а также техническими средствами фиксации и передачи информации о параметрах выбросов в государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду.

Мероприятия по защите населения при изменении состояния атмосферного воздуха, угрожающем жизни и здоровью людей, регули-

руются ст. 19 Федерального закона от 04.05.1999 г. № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха», согласно которой в городских и иных поселениях органы государственной власти субъектов Российской Федерации и органы местного самоуправления организуют работы по регулированию выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в периоды НМУ. При получении прогнозов НМУ юридические лица и индивидуальные предприниматели, имеющие источники выбросов, обязаны проводить мероприятия по уменьшению выбросов, согласованные с органами регионального государственного экологического надзора. Информация о НМУ представляется территориальным органом Федеральной службы Росгидромета в территориальный орган Федеральной службы Росприроднадзора, а также в орган регионального государственного экологического надзора, которые обеспечивают контроль за проведением юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями согласованных мероприятий по уменьшению загрязняющих выбросов.

При изменении состояния атмосферного воздуха, которое вызвано аварийными выбросами загрязняющих веществ и при котором создается угроза жизни и здоровью человека, принимаются экстренные меры по защите населения в соответствии с законодательством Российской Федерации о защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Под *регулированием выбросов в атмосферу*, согласно РД 52.04.306-92 (1992), понимается их временное сокращение в периоды НМУ, когда может формироваться высокий уровень загрязнения воздуха. Регулирование выбросов осуществляется на основе предупреждений о возможном опасном росте концентраций загрязняющих веществ в воздухе с целью его предотвращения. Разработка мероприятий по регулированию выбросов проводится при разработке норм предельно допустимых выбросов. Они пересматриваются не реже одного раза в 5 лет, а также при изменении технологии производства и выбросов вредных веществ в атмосферу.

Согласно РД 52.04.306-92 (1992) в периоды НМУ при прочих равных условиях необходимо в первую очередь сокращать холодные выбросы и выбросы из низких источников.

Мероприятия по кратковременному сокращению выбросов в периоды НМУ должны быть эффективными и практически выполнимыми, учитывать специфику производств, поэтому их целесообразно разрабатывать непосредственно на предприятиях и в отраслевых про-

ектных институтах. Выполнение этих мероприятий при определенных условиях возможно без сокращения объемов производства.

В целях необходимого сокращения выбросов в периоды НМУ следует ориентироваться на степень опасности загрязнения атмосферного воздуха, от которой будет зависеть режим работы предприятия. Так, снижение концентраций вредных веществ в воздухе в случае работы по первому режиму может быть обеспечено на 15–20 %, по второму – на 30–40 %, по третьему – на 50 % и более.

Мероприятия по сокращению выбросов в периоды НМУ могут быть общими для предприятий различных отраслей и специфическими, применимыми к конкретным производствам.

К числу общих мероприятий, согласно РД 52.04.306-92 (1992), можно отнести следующие.

При первом режиме:

- усиление контроля за точным соблюдением технологического регламента производства;
- запрещение работы оборудования на форсированном режиме;
- рассредоточение во времени работы технологических агрегатов, которые не участвуют в едином непрерывном технологическом процессе и выбрасывают в атмосферу вредные вещества;
- усиление контроля за работой контрольно-измерительных приборов и автоматики управления технологическими процессами;
- запрещение продувки и чистки оборудования, газоходов, емкостей, в которых хранились загрязняющие вещества, ремонтных работ, связанных с повышенным выделением вредных веществ в атмосферу;
- усиление контроля за герметичностью газоходных систем и агрегатов, мест пересыпки пылящих материалов и других источников пылегазовыделения;
- усиление контроля за техническим состоянием и эксплуатацией всех газоочистных установок;
- обеспечение бесперебойной работы всех пылеочистных систем и сооружений и их отдельных элементов, предотвращение снижения их производительности, а также отключение на профилактические осмотры, ревизии и ремонты;
- обеспечение эффективного орошения пылегазоуловителей;
- ограничение погрузочно-разгрузочных работ, связанных со значительными выделениями в атмосферу загрязняющих веществ;
- использование запаса высококачественного сырья, при работе на котором обеспечивается снижение выбросов;

- проведение влажной уборки производственных помещений предприятия, где это допускается правилами техники безопасности;
- прекращение испытания оборудования, связанного с изменениями технологического режима, приводящими к увеличению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

При втором режиме:

- снижение производительности отдельных аппаратов и технологических линий, работа которых связана со значительным выделением в атмосферу вредных веществ;
- остановка оборудования в случае, если сроки начала планово-предупредительных работ по ремонту технологического оборудования и наступления НМУ достаточно близки;
- уменьшение интенсивности технологических процессов, связанных с повышенными выбросами на тех предприятиях, где за счет интенсификации и использования более качественного сырья возможна компенсация отставания в периоды НМУ;
- перевод котельных и ТЭЦ, где это возможно, на природный газ или малосернистое и малозольное топливо, при работе с которым обеспечивается снижение выбросов вредных веществ в атмосферу;
- ограничение использования автотранспорта и других передвижных источников выбросов на территории предприятия и города согласно заранее разработанным схемам маршрутов;
- прекращение обкатки двигателей на испытательных стендах;
- принятие мер по предотвращению испарения топлива;
- запрещение сжигания отходов производства и мусора, если оно осуществляется без использования специальных установок, оснащенных пылегазоулавливающими аппаратами;
- запрещение работ на холодильных и других установках, связанных с утечкой загрязняющих веществ.

При третьем режиме:

- снижение нагрузки или остановка производств, сопровождающихся значительными выделениями загрязняющих веществ;
- отключение аппаратов и оборудования, работа которых связана со значительным загрязнением воздуха;
- запрещение производства погрузочно-разгрузочных работ, отгрузки готовой продукции, сыпучего исходного сырья и реагентов, если при этом происходит загрязнение атмосферы;
- перераспределение нагрузки производства и технологических линий на более эффективное оборудование;

- остановка пусковых работ на аппаратах и технологических линиях, сопровождающихся выбросами в атмосферу;
- запрещение выезда на линии автотранспортных средств (включая личный транспорт) с неотрегулированными двигателями;
- снижение нагрузки или остановка производства, не имеющего газоочистных сооружений;
- остановка технологического оборудования в случае выхода из строя газоочистных устройств;
- проведение поэтапного снижения нагрузки параллельно работающих однотипных технологических агрегатов и установок (вплоть до исключения одного, двух, трех и т.д. агрегатов).

При составлении предупреждений *для местного населения* могут быть рекомендованы следующие мероприятия:

- сокращение поездок на личном автотранспорте;
- запрещение открытого сжигания на территории города;
- ограничение сжигания угля в домашних печах;
- усиленный полив дворов, улиц и площадей в теплую часть года;
- отказ от массовых мероприятий на открытом воздухе и др.

По итогам выполненных мероприятий проводится анализ эффективности работ по прогнозу и регулированию выбросов и при необходимости направляются предложения в природоохранные органы. Эффективность оценивается в целом по предприятию и по всему городу. Снижение уровня загрязнения в результате проведенных мероприятий можно обнаружить, используя обобщенные показатели загрязнения воздуха, в том числе параметра P . Например, если при составлении предупреждения о наступлении НМУ показатель P составлял 0,4, а в период его действия он снизился до 0,3 при условии сохранения НМУ, то данное предупреждение оказалось эффективным.

Данные по оценке эффективности работ по прогнозированию загрязнения воздуха обобщаются, включаются в годовые отчеты и используются в целях повышения эффективности прогнозирования и регулирования выбросов в каждом отдельном населенном пункте.

Примеры технологических и организационных мероприятий для различных отраслей промышленности, согласно РД 52.04.52-85 «Методические указания. Регулирование выбросов при неблагоприятных метеорологических условиях» (1985), приведены ниже.

Для предприятий черной металлургии:

- снижение уровня загрузки шихты, укрупнение помола и удлинение периода коксования в коксохимическом производстве;

- поддержание оптимальной скорости просасывания воздуха через слой шихты;
- применение бесфенольной воды для тушения кокса;
- перевод доменных печей на «тихий ход»;
- остановка аглофабрики или отдельных ее участков при наличии запасов агломерата;
- повышение концентрации кислорода в воздухе просасыванием через слой агломерата;
- прекращение продувки сталеплавильных агрегатов кислородом;
- обеспечение полного сжигания избытков доменного газа и безосадочного режима работы доменных печей во избежание выброса доменного газа через колошниковые свечи;
- предотвращение остановок доменных печей, связанных с необходимостью полной выдувки печи и сброса доменного газа в атмосферу через колошниковые свечи;
- запрещение остановки газопылеулавливающих сооружений для выполнения профилактических работ в продувочный период;
- уменьшение отпуска пара и тепла на второстепенные нужды;
- в паровых котлах ТЭЦ использование доменного газа;
- проведение выгрузки пыли из пылеуловителей доменного цеха только после ее увлажнения;
- проведение поливки поверхностей пылевидных отходов;
- приостановка, а в случае невозможности сведение к минимуму пропарки трубопроводов, резервуаров и железнодорожных цистерн;
- прекращение чистки поддона градирен конечного охлаждения, отстойников фенольных вод.

Для предприятий теплоэнергетики (ТЭЦ, ГРЭС, котельные):

- перевод котлоагрегатов на природный газ или малосернистое и малозольное топливо;
- снижение нагрузки вплоть до полного отключения в особо опасные периоды котлов, работающих на высокосернистом и высокозольном топливе;
- предотвращение пыления с поверхности золоотвалов путем их периодического смачивания;
- уменьшение подачи угля на склад при его разгрузке из вагонов;
- снижение нагрузок на котлоагрегаты с целью создания устойчивого разрежения в топочном пространстве;
- отключение вакуумных насосов пневмоудаления;
- отключение аспирационных установок на тракте топливоподачи;

- отключение котлоагрегатов, в которых бункеры под батарейными циклонами заполнены на 100 %;
- усиление контроля за режимом горения, поддержание избытка воздуха на уровне, устраняющем условия образования недожога, ведение режима горения по отлаженным кислородомерам;
- прекращение работ по очистке поверхностей нагрева котлов, разгрузке всех видов сыпучих материалов на открытом воздухе, перевалке, разгрузке и укатке угля на открытых угольных складах;
- проверка нагрузок на котлах, режимов котлов и газопылеулавливающих установок в соответствии с режимными картами.

Для *предприятий цветной металлургии* перечень мероприятий может включать:

- строгое соблюдение технологического режима и графика выдачи конверторных газов, обеспечивающих максимальное использование газов сернокислотными цехами;
- разработка и строгое выполнение графика конвертирования с учетом возможности полного забора газа сернокислотными цехами;
- запрет на эксплуатацию основного технологического оборудования в форсированном режиме с целью предотвращения интенсивных выбросов;
- строгое соблюдение технологии сушки концентрата, сохранение исходного сырья;
- предотвращение выброса конвертерных газов, обеспечение непрерывной работы холодильников и сернокислотных цехов.

Для *предприятий по производству стройматериалов*:

- перевод вращающихся печей, цементных и сырьевых мельниц, а также другого технологического оборудования на «тихий ход»;
- уменьшение количества воздуха, просасываемого через сушильные барабаны и цементные мельницы;
- снижение разрежения после сырьевых мельниц за счет прикрытия основного дымососа;
- прекращение подачи цемента в бетоносмесительные узлы;
- использование резервных контейнеров для аварийного выброса пыли;
- осуществление выгрузки пыли из бункеров циклонов дробильного отделения в контейнеры через специальные эластичные рукава;
- уменьшение выбросов пыли в атмосферу путем прекращения дробления исходного сырья;
- улавливание сырья, используемого в производстве.

Для предприятий нефтехимической и химической промышленности:

- ограничение или полное прекращение работ, связанных с регенерацией катализаторов и осушителей;
- перераспределение нагрузки на работающие печи;
- обеспечение полного сжигания отработанных газов в технологических печах;
- остановка или сокращение работы вспомогательных или опытных производств;
- исключение из технологической схемы колонны отпарки сточных вод с переводом их в накопительные емкости;
- запрещение вскрытия и продувки технологических аппаратов и емкостей с целью предотвращения залповых выбросов;
- запрещение пуска и остановки систем хлорирования для исключения залпового выброса хлора;
- повышение КПД пылегазоулавливающих установок путем увеличения плотности орошения скрубберов, изменение схем подачи рассола на холодильники;
- плавный сброс давления в аппаратах и т.д.;
- прекращение или ограничение работ по переливанию вредных и особенно быстроиспаряющихся жидкостей;
- смещение во времени операций (синтеза и др.), в результате которых выделяется значительное количество вредных веществ.

Для машиностроительных предприятий:

- сокращение или полное прекращение работ на ваннах травления и гальванических участках;
- в литейных цехах по возможности приостановка технологических процессов, связанных с большим количеством выбросов;
- усиление контроля за соблюдением уровня раствора в ваннах;
- усиление контроля при загрузке вагранок металлоломом с целью исключения попадания посторонних примесей;
- запрет залповых выбросов в атмосферу;
- строгое соблюдение технологического режима литейного, кузнечного и гальванического производства;
- запрещение очистки дробометных камер;
- прекращение работы на выбивных решетках литейных цехов;
- сокращение до минимума электрогазосварочных работ;
- уменьшение объема работ с красителями, кислотами, щелочами и другими агрессивными вредными веществами;

- запрещение испытаний изделий на форсажных режимах;
- снижение производительности дробеструйных камер, набивных решеток, дробометных барабанов.

Для автотранспортных предприятий:

- усиление контроля за выбросами автотранспорта путем проверки состояния и работы двигателей, определение содержания оксида углерода в выхлопных газах;
- предотвращение заторов автотранспорта на улицах путем расщедоточения движения;
- отмена рейсов, не являющихся абсолютно необходимыми;
- ограничение движения личных автомашин и мотоциклов;
- перераспределение потоков на улицах.

Для предприятий легкой промышленности:

- запрещение чистки фильтров кондиционеров и пылевых камер;
- сокращение электросварочных и паяльных работ;
- уменьшение (прекращение) работ на гальванических участках и в цехах вагранок;
- уменьшение объема работ с применением красителей, кислот, щелочей, формальдегидов и других агрессивных вредных веществ, выделяющихся в атмосферу.

Контрольные вопросы

1. Что включают мероприятия по контролю качества атмосферного воздуха и кто их проводит?
2. Что такое НМУ? Какие вы знаете мероприятия по регулированию выбросов в период наступления НМУ?
3. Какие мероприятия по снижению загрязнения воздуха могут быть применены на предприятиях черной металлургии?
4. Какие мероприятия по снижению загрязнения воздуха могут быть применены на предприятиях цветной металлургии?
5. Какие мероприятия по снижению загрязнения воздуха могут быть применены на предприятиях нефтехимической и химической промышленности?
6. Какие мероприятия по снижению загрязнения воздуха могут быть применены на машиностроительных предприятиях?
7. Какие мероприятия по снижению загрязнения воздуха могут быть применены на предприятиях по производству стройматериалов?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Среди различных видов негативного воздействия на окружающую среду особое место занимает загрязнение атмосферного воздуха. Атмосфера – наиболее динамичная и весьма специфичная природная среда, обладающая целым рядом особенностей. Распространение загрязняющих веществ в атмосфере может иметь глобальный масштаб. Негативное воздействие загрязняющих веществ на живые организмы наиболее быстро и остро проявляется через атмосферный воздух. Попадая в атмосферу, примеси могут как непосредственно оказывать негативное воздействие на человека, животных и растения, так и опосредованно через загрязнение воды и почвы.

С учетом вышеизложенного охране атмосферного воздуха в Российской Федерации уделяется особое внимание. При этом большая роль отводится прогнозированию загрязнения воздуха. Составление краткосрочных прогнозов загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха позволяет вовремя предпринять необходимые меры и минимизировать негативные последствия загрязнения, что особенно важно во время наступления неблагоприятных метеорологических условий.

Тесная связь между накоплением и распространением примесей в атмосфере и отдельными метеорологическими элементами, а также их совокупностью и определенными метеорологическими условиями была установлена еще в прошлом веке. Знание закономерностей поступления, рассеивания, переноса, вымывания и трансформации загрязняющих веществ в атмосфере в зависимости от параметров солнечной радиации, термического режима нижних слоев атмосферы, влажности воздуха, режима осадков, параметров ветра позволяет составлять качественные и достоверные прогнозы загрязнения воздуха и наступления особо неблагоприятных метеорологических условий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Алоян А. Е. Моделирование динамики и кинетики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере: моногр. – М.: Наука, 2008. – 415 с.

Анапольская Л. Е., Безуглая Э. Ю. О вероятности слабых ветров на территории СССР // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – Вып. 325. – С. 61–67.

Аргучинцев В. К., Аргучинцева А. В. Моделирование мезомасштабных гидротермодинамических процессов и переноса антропогенных примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2007. – 255 с.

Ашабоков Б. А., Шаповалов А. В. Конвективные облака: численные модели и результаты моделирования в естественных условиях и при активном воздействии. – Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2008. – 252 с.

Безуглая Э. Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 184 с.

Безуглая Э. Ю., Смирнова И. В. Воздух городов и его изменения. – СПб: Астерион, 2008. – 253 с.

Безуглая Э. Ю., Воробьева И. А., Ивлева Г. П. Возможность оценки высоких концентраций формальдегида при изменении температуры воздуха // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – Л.: Гидрометеиздат, 2012. – Вып. 565. – С. 89–102.

Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.

Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.

Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Демьянович В. К. Некоторые актуальные вопросы исследования атмосферной диффузии // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – Вып. 172. – С. 3–22.

Берлянд М. Е., Канчан Я. С. К теории образования радиационных туманов и их влияния на распространение примесей // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – Вып. 293. – С. 3–20.

Берлянд М. Е., Оникул Р. И. К теории трансформации воздушных масс и образования речных туманов // Труды Главной геофизической

обсерватории им. А. И. Воейкова. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – Вып. 207. – С. 14–27.

Бримбкумб П. Состав и химия атмосферы. – М.: Мир., 1988. – 235 с.

Вавилова Н. Г., Генихович Е. Л., Сонькин Л. Р. Статистический анализ данных о загрязнении воздуха в городах с помощью естественных функций // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – Вып. 238. – С. 27–32.

Вдовин Б. И., Царев А. М. О развитии штилей в пограничном слое атмосферы // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – Вып. 238. – С. 191–194.

Воздействие на окружающую среду кратковременных выбросов большой мощности: учеб. пособие / *В. М. Суслонов, Н. Г. Максимович, В. Н. Иванов, В. А. Шкляев.* – Пермь: Перм. ун-т, 2005. – 126 с.

Высота слоя перемешивания / *Э. Ю. Безуглая, Н. Н. Бороздина, Л. А. Лаврова* [и др.] // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – Вып. 417. – С. 84–89.

Гаргер Е. К. К оценке скорости и направления переноса примеси в пограничном слое атмосферы // Труды ИЭМ. – М.: Гидрометеиздат, 1984. – Вып. 37(120). – С. 55–65.

ГН 2.1.6.3492-17 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений». – М., 2017. – 67 с.

Горбаренко Е. В., Еремина И. Д. Роль осадков в процессе очищения атмосферы от аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. – Томск, 1998. – Вып. 11. № 5. – С. 15–23.

ГОСТ 17.2.1.04-77. Охрана природы. Атмосфера. Источники и метеорологические факторы загрязнения, промышленные выбросы. Термины и определения : постановление Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 28 июня 1977 г. № 1611: введ. 01.07.78 № 1: утв. в июне 1983 г. (ИУС №10-83). – М., 1977. – 20 с.

Дымников В. П., Алоян А. Е. Монотонные схемы решения уравнений переноса в задачах прогноза погоды, экологии и теории климата // ИАН. Физика атмосферы и океана. – Т. 26, № 12. – М.: Гидрометеиздат, 1984. – С. 1237–1247.

Ежегодник. Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2010 г. / под ред. *Э. Ю. Безуглой.* – СПб: Д'АРТ, 2011. – 224 с.

Елекоева Л. И., Чувашина И. Е. Анализ поля концентрации сернистого газа методом разложения по естественным ортогональным

функциям // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – Вып. 436. – С. 72–78.

Ивахненко А. Г, Лапа В. Г. Предсказание случайных процессов. – Киев: Наукова думка, 1971. – 416 с.

Илькун Г. М. Отфильтровывание воздуха от поллютантов древесными растениями // Взаимодействие между лесными экосистемами и загрязнителями. – Таллин, 1982. – С. 135–138.

Исидоров В. А. Экологическая химия. – СПб: Химиздат, 2001.

Карлович И. А. Геоэкология. – М.: Академический проект, 2013. – 510 с.

Климат России: науч.-прикладн. справочник. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД. – URL.: <http://aisori.meteo.ru/Clspr> (дата обращения: 24.03.2020).

Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере: справ. пособие / под ред. Э. Ю. Безуглой и М. Е. Берлянда. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 328 с.

Климатические параметры Восточно-Сибирского и Дальневосточного экономических районов: научно-справочное пособие / под ред. Л. Е. Анапольской, И. Д. Копанева. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 390 с.

Косарев В. П., Таранков В. И. Лесная метеорология. – М.: Экология, 1991. – 176 с.

Крюкова С. В., Симакина Т. Е. Анализ температурных инверсий в Санкт-Петербурге // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – СПб, 2015. – Вып. 40. – С. 150–159.

Кузнецова И. Н. Особенности атмосферных процессов, влияющих на загрязнение воздуха в Московском регионе, и методы их краткосрочного прогноза: автореф. дис. ...д-ра геогр. наук / Кузнецова И. Н. – М., 2012. – С. 41.

Ладейщиков Н. П. Характерные черты климата и некоторые задачи климатических исследований в зоне БАМ. – Иркутск, 1985. – 103 с.

Лазарева Е. О., Попова Е. С. Особенности пространственно-временной динамики антропогенных примесей воздуха г. Санкт-Петербурга за период времени с 1980 по 2012 гг. (на примере оксида углерода, диоксида азота, взвешенных веществ) // Учёные записки РГГМУ. – СПб, 2014. – № 37. – С. 204–215.

Луценкова Е. О., Хаустов А. П. Влияние метеорологических условий на качество атмосферы поселка Ямбург // Экологические системы и приборы. – 2009. – № 5. – С. 22–27.

Мажиг Ч., Сонькин Л. Р., Цэрэндэлэг. Прогнозирование загрязнения воздуха в городах в условиях резко континентального климата // Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы: Итог сотрудничества соц. стран. – Л., 1988. – Вып. 3. – С. 115–122.

Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 317 с.

Марчук Г. И., Кондратьев К. Я., Дымников В. П. Некоторые проблемы теории климата. – М.: ВИНТИ, 1983. – 208 с.

Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и океана / *Г. И. Марчук, В. П. Дымников, В. Б. Залесный* [и др.]. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 318 с.

Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Изд. 2-е перераб. и доп. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 751 с.

Махонько К. П. Элементарные теоретические представления о вымывании примесей осадками из атмосферы // Труды Института прикладной геофизики. – М., 1967. – Вып. 8. – С. 26–34.

Метеорологические условия, способствующие увеличению концентрации пыли в воздухе в районе Канто / *Mizuno Tateki* // Ind. Pollut. Contr. – 1988. – Vol. 24. – № 5. – P. 354–362.

Методические указания по прогнозу загрязнения воздуха в городах / под ред. *М. Е. Берлянда*. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 80 с.

Миланова Е. В., Рябчиков А. М. Географические аспекты охраны природы. – М.: Мысль, 1979. – 293 с.

Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. – М.: Наука, 1965. – Ч. 1. – 410 с.

Некоторые характеристики метеорологических и аэрологических условий задымления в г. Новосибирске / *Л. И. Введенская, Т. Г. Володкевич, И. П. Леонтович, И. А. Шевчук* // Труды НИИАК, 1967. – Вып. 48. – С. 177–182.

Об охране атмосферного воздуха: Федеральный закон № 96-ФЗ от 04.05.1999 г. – М., 1999. – 30 с.

Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе: приказ Минприроды России от 06.06.2017 г. № 273. – М., 2017. – 99 с.

Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.1.6.3492-17 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений: постановление

ние Главного государственного санитарного врача РФ от 22.12.2017 г. № 165. – М., 2017. – 35 с.

Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.2.5.3532-18 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны: постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 13.02.2018 г. № 25. – М., 2018. – 205 с.

Отчет о НИР «Разработать усовершенствованный комплексный метеорологический показатель рассеивающей способности атмосферы на примере территории Западной Сибири (заключительный). – Новосибирск: СибНИГМИ, 2014. – 132 с.

О расчете интегральных характеристик загрязнения воздуха на территории города / *М. Е. Берлянд, Е. А. Генихович, Р. И. Оникул, С. С. Чичерин* // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – Вып. 436. – С. 17–29.

Пономаренко, И. Н. Краткосрочный прогноз высокой общей загрязненности воздуха на примере Киева // Метеорология и гидрология, 1975. – № 10. – С. 43–50.

Потепление как возможная причина повышения химической активности атмосферы городов / *Э. Ю. Безуглая, И. А. Воробьева, Г. П. Ивлева, Е. А. Махоткина* // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – Л.: Гидрометеиздат, 2008. – Вып. 557. – С. 159–183.

Рекомендации по определению метеорологического потенциала атмосферы Сибирского экономического района / отв. исполнитель Т. С. Селегей. – Новосибирск, 1987. – 164 с.

Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь / под ред. А. И. Бедрицкого. – СПб; М.: Летний сад, 2008. – Т. 1.: А–И. – 336 с.

Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь: под ред. А. И. Бедрицкого. СПб; М.: Летний сад, 2009. – Т. 2.: К–П. – 312 с.

Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь: под ред. А. И. Бедрицкого. СПб; М.: Летний сад, 2009. – Т. 3.: Р–Я. – 216 с.

Руководящий документ РД 52.04.306-92. Охрана природы. Атмосфера. Руководство по прогнозу загрязнения воздуха. – М., 1992. – 79 с.

Руководящий документ РД 52.04.52-85. Методические указания. Регулирование выбросов при неблагоприятных метеорологических условиях. – М., 1985. – 58 с.

Руководящий документ РД 52.04.667-2005. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению, содержанию. – М., 2005. – 50 с.

Рязанов В. И. Исследование распространения примесей в атмосфере при работе ракетных двигателей с учетом фактических метеопараметров: дис. ...канд. физ.-мат. наук / Рязанов В. И. – Нальчик, 2019. – 148 с.

Сайжаа Н. Факторы загрязнения воздушного бассейна городов Монголии: автореф. дис. ...д-ра мед. наук: 14.00.07 / Сайжаа Н. – Иркутск, 2004. – 43 с.

Селегей Т. С. Формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах Сибири. – Новосибирск: Наука, 2005. – 347 с.

Селегей Т. С., Юрченко И. П. Потенциал рассеивающей способности атмосферы // География и природные ресурсы. – 1990. – № 2. – С. 132–137.

Селегей Т.С., Филоненко Н.Н., Ленковская Т.Н. Изменчивость содержания приземного озона в атмосферном воздухе г. Новосибирска и его зависимость от метеорологических факторов // География и природные ресурсы: Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт. – Новосибирск, 2011. – № 3. – С. 78–83.

Синоптические условия формирования периодов высокого загрязнения воздуха в различных районах СССР / *Л. Р. Сонькин, А. И. Багрецова, Е. И. Иванова* [и др.] // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – Вып. 436. – С. 49–54.

Скудневская Г. И., Дульцева Г. Г. Загрязнение атмосферы формальдегидом. Аналитический обзор. – Новосибирск, 1994. – 70 с.

Сляднев А. П. Географические основы климатического районирования и опыт их применения на юго-востоке Западно-Сибирской равнины // География Западной Сибири. – Новосибирск, 1965. – С. 3–122.

Сонькин Л. Р. Некоторые возможности прогноза содержания примесей в городском воздухе // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – Вып. 254. – С. 121–132.

Сонькин Л. Р. Вопросы прогнозирования фонового загрязнения воздуха в городах // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – Вып. 314. – С. 42–51.

Сорокина Л. П. Климатические аспекты формирования экологических проблем в Восточной Сибири // География и природные ресурсы. – 1995. – № 3.

Степаненко С. Н., Волошин В. Г., Типцов С. В. Решение уравнения турбулентной диффузии для стационарного и точечного источника // Украинский гидрометеорологический журнал. – 2008. – № 3. – С. 13–24.

Толмачева Н. И. Физическая метеорология: учеб. пособие. – Пермь: Перм. нац. исслед. ун-т, 2012. – 324 с.

Транспортная модель распространения газообразных примесей в атмосфере города / *И. В. Белов, М. С. Беспалов, Л. В. Клочкова* [и др.] // Математическое моделирование. – 2000. – Т. 12. – № 11. – С. 38–46.

Уральское управление гидрометеорологической службы. – URL: http://svgimet.ru/?page_id=181.

Фетт В. Атмосферная пыль. – М.: Изд-во иностран лит-ры, 1961. – 336 с.

Формальдегидное загрязнение городской атмосферы и его зависимость от метеорологических факторов / *Т. С. Селегей, Н. Н. Филоненко, В. А. Шлычков* [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – Новосибирск: Изд.-во Сиб. отд. РАН, 2013. – Т. 26. – № 5. – С. 422–426.

Хргиан А. Х. Физика атмосферы. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 328 с.

Bringfelt B. Important factors for the sulphur dioxide concentration in central Stockholm // *Atm. Env.* – 1971. – № 11. – P. 949–972.

Buttner K. Der Einflub des Grobstadtdunstes auf Sonnenund Him-
melsstrahlung. *Meteor*, 1929. – Z. 46, 521–525.

Chandler T. J. Elson D. M. Meteorological controls upon ground level concentration of smoke and sulphur dioxide in two urban areas of the United Kingdom // *Atmos. Env.* – 1978. – V. 12. № 6–7. – P. 1543–1554.

Feigley C., Kamens R., Jeffreies F. An experimental simulation of Los Angeles reactive pollutant programme (LARPP) operation 33 – 11 evolution of simulation // *Atm. Env.* – 1983. – Vol. 17. – № 1. – P. 103–110.

Graham J. R. An analysis of turbulence statistics at Fort Wayne, Indiana // *J. Appl.* – 1968. – Vol. 7. – P. 90–93.

Hesek F. The physical statistical analysis one year's observations of SO₂ in Bratislava // *Contr. Inst. Met. Climatology SASc.* – 1974. – № 1. – P. 111–126.

Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction theory // *Trans ASME. Ser. D.S. Basic Endin.* – 1960. – Vol. 82. – P. 17–25.

Kasprzycki A. Powstawanie niskiego prądu strumienia nowego. w. Stacjonarym polu wysokim // *Cisnienia Materiały. IMGW.* – Warszawa, 1978.

Melli P., Fronza G. An application of a pollution episode prediction derived from a theory model // *Air pollution Modeling and its Application*. I. Ed. C. D. Wispelaere. N. Y., 1981. – P. 639–652.

McCormick R. A. Meteorological aspects of air pollution in urban and industrial districts // *WMO Tech. Note.* – 1970. – № 106. – P. 1–30.

Peterson S. Distribution of sulfur dioxide over metropolitan St. Luis as described by empirical eigen vectors and meteorological parameters // *Atm. Env.* – 1970. – Vol. 4, № 5. – P. 501–518.

Runca E., Melli P., Spizito A. Real time forecast of sulphur dioxide concentrations in the Venetian lagoon region // P. 1. Advection diffusion model. IIASA – Laxenberg, 1979. – 24 p.

Shaw Sir N., Owens S. The Smoke Problem of Great Cities. – London, 1925.

Stephens E. R. Chemistry of atmospheric oxidants // *J. Air Poll Cont. ass.* – 1969. – № 3. – P. 181–185.

Учебное издание

Морозов Андрей Евгеньевич
Стародубцева Наталья Ивановна

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ

978-5-94984-752-7



Редактор Е. Л. Михайлова
Оператор компьютерной верстки О. А. Казанцева

Подписано в печать 03.07.2020

Формат 60x84/16

Уч.-изд. л. 7,9

Усл. печ. л. 7,44

Тираж 300 экз. (1-й завод 35 экз.)

Заказ №

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»
620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37
Тел.: 8(343)262-96-10. Редакционно-издательский отдел

Типография ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР УПИ»
620062, РФ, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2.
Тел.: 8(343)362-91-16